



TUGAS AKHIR - RE 141581

PROGRAM PENGELOLAAN EMISI GAS RUMAH KACA DI TPA BENOWO

USMAN AZKA JAISYULLAH
3313100079

Dosen Pembimbing:
Dr. Ir. Ellina S. Pandebesie, M.T

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR – RE 141581

PROGRAM PENGELOLAAN EMISI GAS RUMAH KACA DI TPA BENOWO

USMAN AZKA J.

3313100079

DOSEN PEMBIMBING

Dr. Ir. Ellina S. Pandebesie, M.T.

JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2017

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT - RE 141581

GREEN HOUSE GAS MANAGEMENT PROGRAM IN BENOWO LANDFILL

USMAN AZKA J.

3313100079

SUPERVISOR

Dr. Ir. Ellina S. Pandebesie, M.T.

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Faculty of Civil Engineering and Planning

Institute of Technology Sepuluh Nopember

Surabaya 2017

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

PROGRAM PENGELOLAAN EMISI GAS RUMAH KACA DI TPA BENOWO

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik

pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

USMAN AZKA J.

NRP: 3313100079

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir



Dr. Ir. Ellina S. Pandebesie, M.T.

NIP. 19560304 199203 2 001



Program Pengelolaan Emisi Gas Rumah Kaca di TPA Benowo

Nama Mahasiswa : Usman Azka Jaisyullah
NRP : 3313 100 079
Jurusan : Teknik Lingkungan FTSP-ITS
Pembimbing : Dr. Ir. Ellina S. Pandebesie, MT.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menghitung potensi emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari penimbunan sampah di TPA Benowo dan merekomendasikan program pengelolaan emisi gas rumah kaca. Gas rumah kaca yang dihitung adalah gas metan. Metode yang digunakan untuk menghitung emisi gas rumah kaca yaitu IPCC *Guidelines* 2006 sedangkan untuk menentukan program pengelolaan emisi gas metan menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process*.

Metode IPCC digunakan untuk menghitung emisi gas metan yang dihasilkan dari sampah yang ditimbun di TPA Benowo. Perhitungan emisi gas metan menggunakan 3 skenario yaitu skenario pertama dengan kondisi eksisting yang ada saat ini di TPA Benowo, skenario kedua dengan reduksi dengan metode komposting di sumber, dan skenario ketiga dengan reduksi oleh metode komposting dan pemilahan di sumber. Pemilihan pengelolaan terbaik mempertimbangkan aspek teknis dan aspek lingkungan menggunakan metode AHP dengan bantuan *software Expert Choice*.

Proyeksi gas metan dari perhitungan menggunakan metode IPCC *Guidelines* 2006 tier 2 yang untuk kondisi sampah eksisting memiliki total sebesar 180,047 Gigagram. Proyeksi gas metan sebesar 172,216 Gigagram dan 69,014 Gigagram jika menggunakan skenario proses komposting sampah di sumber. Proyeksi gas metan sebesar 170,796 Gigagram dan 62,285 Gigagram jika menggunakan skenario proses komposting dan pemilahan sampah di sumber. Hasil perhitungan menggunakan metode *Triangular Method* yaitu sebesar 100,166 Gigagram. Perbandingan terjadi antara

metode *IPCC* dan *Triangular Method* dikarenakan adanya perbedaan asumsi terkait estimasi gas metan.

Pemilihan teknologi pengelolaan emisi gas metan dilakukan menggunakan metode AHP dibantu dengan *software expert choice*. Perbandingan dilakukan antara teknologi konversi gas metan menjadi listrik menggunakan *Internal Combustion Engine*, konversi gas metan menjadi biogas, dan penghancuran gas metan menggunakan metode *Enclosed Flaring* dan penilaian teknologi mempertimbangkan aspek teknis dan lingkungan. Hasil total dari penilaian dengan mempertimbangkan aspek teknis dan lingkungan didapatkan bahwa teknologi konversi gas metan menjadi listrik lebih baik dibandingkan teknologi konversi gas metan menjadi biogas dan *flaring*. Teknologi listrik menjadi yang pertama dikarenakan nilai pada kriteria pemanfaatannya yang tinggi dan diharapkan mampu *removal* emisi gas metan secara penuh. Program pengelolaan emisi gas metan yang dipilih adalah menggunakan teknologi konversi gas metan menjadi listrik pada tahun ke 8 dan dari tahun pertama menggunakan teknologi *flaring* untuk menghancurkan gas metan.

Kata kunci : AHP, IPCC, Gas Rumah Kaca, *Landfill*, Metan,TPA Benowo.

Green House Gas Management Program in Benowo Landfill

Name : Usman Azka Jaisyullah
NRP : 3313 100 079
Department : Environmental Engineering
Supervisor : Dr. Ir. Ellina S. Pandebesie, MT.

ABSTRACT

The purpose of this experiment are to calculate the emission from landfill gas produced by degradation process of solid waste in Benowo landfill and decide green house gas management program. Green house gas that calculate in this experiment is methane. Method use in this experiment is IPCC Guidelines 2006 and to decide the best program the method use in this experiment is Analytical Hierarchy Process.

The methane emission for IPCC use three scenarios there are first scenario the existing, second scenario with reduce solid wst from the source by composting, and the third scenario by combine composting and recycling from the source. Enviromental and technical aspect are the consideration for determine the best program.

Projection of methane gas emission using IPCC Guidelines 2006 tier 2 method for existing scenario are 180,047 Gigagram. Projection of methane gas emission are 172,216 Gigagram and 69,014 Gigagram if use scenario that have composting of solid waste in source. Projection of methane gas emission are 170,796 Gigagram and 62,285 Gigagram if use scenario that have composting and recycling of solid waste in source. The result from triangular method are 100,166 Gigagram. There are difference between IPCC and triangular method because of different assumption of methane emitted. The method to determine the best technology for managing methane emission is *Analytical Hierarchy Process* with the help of Expert Choice software. This method help compare 3 different technologies between conversion of methane become electricity using Internal Combustion Engine,

conversion of methane become biogas, and destroy methane with enclosed flaring system. Comparison between those 3 technologies have consideration of technical and environmental aspect. The result of AHP method are conversion of methane emission become electricity are better than conversion of methane emission become biogas and flaring. Enclosed flaring become the last because this method destroy the potential of methane gas as a renewable energy but this technology have advantages in operational and maintenance that easy and cheap. Program manage methane emission from landfill are use conversion technology of methane become electricity at the 8th year and from the first year use flaring to destroy methane emission from landfill.

Keywords : AHP, IPCC, GHG, *Landfill*, Methane TPA Benowo,

KATA PENGANTAR

Tiada kata yang indah untuk bersyukur kecuali ucapan Hamdallah, segala puji bagi Allah SWT atas segala karunia dan ridho-Nya dan juga utusan-Nya, yaitu Rasulullah SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Program Pengelolaan Emisi Gas Rumah Kaca di TPA Benowo”. Penyusunan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari partisipasi dan bimbingan dari semua pihak. Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ibu Dr. Ir. Ellina S. Pandebesie, M.T atas bimbingan dan arahnya selama pengerjaan tugas akhir
2. Bapak Dr. Ir. Ali Masduqi, M.T., Bapak Dr. Ir. Irwan Bagyo, M.T., Bapak Welly Herumurti , S.T., M.Sc. selaku dosen pengarah
3. Kedua orang tua yang memberikan dukungan secara moril dan materil
4. Teman-teman satu dosen asisten dan teman-teman Teknik Lingkungan ITS angkatan 2013 terima kasih atas segala bantuan dan dukungannya.

Penulis berharap semoga segala kebaikan dan ketulusan mendapat balasan dari Allah SWT. Penyusunan laporan ini telah diusahakan semaksimal mungkin, namun sebagaimana manusia biasa tentunya masih terdapat kekurangan. Untuk itu penulis berharap adanya kritik dan saran yang bisa disampaikan kepada penulis. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi pembaca atau penulis yang lain di masa yang akan datang.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Tugas Akhir	3
1.4 Ruang Lingkup	3
1.5 Manfaat Tugas Akhir	4
BAB II	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Definisi Sampah	5
2.2 Sumber-sumber Sampah	5
2.3 Klasifikasi Sampah	6
2.4 Timbulan sampah.....	8
2.5 Tempat Pemrosesan Akhir Sampah	8
2.7 Proses Degradasi Sampah	9
2.8 Produksi Gas	10
2.9 Karakteristik Emisi CH ₄	12
2.10 Perhitungan Emisi Karbon dengan Rumus IPCC (<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>).....	13

2.10.1 Penentuan Metode Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca	13
2.10.2 Emisi GRK dalam satu tahun	13
2.11 Analytical Hierarchy Process	16
2.12 Expert Choice.....	17
2.13 Pengelolaan Gas TPA.....	18
2.14 Gambaran Umum TPA Benowo	20
BAB III.....	21
METODE PENELITIAN	21
3.1 Gambaran Umum.....	21
3.2 Diagram Alir Kerangka Penelitian	21
3.2.1 Ide Penelitian.....	23
3.2.2 Studi Literatur	24
3.2.3 Penentuan Aspek Penelitian	24
3.2.3 Persiapan Penelitian	24
3.2.4 Pelaksanaan Penelitian.....	25
3.2.5 Analisa Data	25
3.2.6 Penyajian Data dan Pembahasan.....	27
3.2.7 Kesimpulan dan Saran	28
3.2.8 Penyusunan Laporan	28
BAB IV	29
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Komposisi Sampah dan Timbulan	29
4.2 Perhitungan Emisi Gas Metan IPCC.....	32
4.2.1 Perhitungan Emisi Gas Metan Skenario 1	33
4.2.2. Perhitungan Emisi Gas Metan Skenario 2	36
4.2.3. Perhitungan Emisi Gas Metan Skenario 3	43

4.2.4	Perbandingan Emisi Gas Metan Skenario	50
4.3.	Perhitungan Gas Metan <i>Triangular Method</i>	52
4.4	Analisa Menggunakan Metode AHP	58
4.5	Konversi Gas Metan menjadi Listrik	67
4.6	Program Pengelolaan Emisi Gas Metan	70
BAB V	.....	75
KESIMPULAN DAN SARAN	.....	75
5.1	Kesimpulan.....	75
5.2	Saran.....	75
DAFTAR PUSTAKA	.....	77
LAMPIRAN	.....	83
BIOGRAFI PENULIS	.....	101

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Proses Degradasi Sampah	10
Gambar 2. 2 Perhitungan gas menggunakan model segitiga Cepat terurai dan b.) Lambat terurai	11
Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian	22
Gambar 3. 3 Hierarki Metode AHP.....	27
Gambar 4. 1 Kesetimbangan Massa Skenario 2 Reduksi 1 ..	38
Gambar 4. 2 Kesetimbangan Massa Skenario 2 Reduksi 2 ..	38
Gambar 4. 3 Emisi Gas Metan Skenario 2.....	42
Gambar 4. 4 Emisi Gas Metan Skenario 2.....	43
Gambar 4. 5 Kesetimbangan Massa Skenario 3 Reduksi 1 ..	45
Gambar 4. 6 Kesetimbangan Massa Skenario 3 Reduksi 2 ..	45
Gambar 4. 7 Emisi Gas Metan Skenario 3.....	49
Gambar 4. 8 Emisi Gas Metan Berdasarkan Komposisi.....	50
Gambar 4. 9 Perbandingan Emisi Gas Metan	51
Gambar 4. 10 Produksi Gas di TPA Benowo	56
Gambar 4. 11 Laju Emisi Gas Metan	58
Gambar 4. 12 Perbandingan Aspek Teknis dan Lingkungan	59
Gambar 4. 13 Perbandingan Kriteria Aspek Teknis.....	60
Gambar 4. 14 Perbandingan Kriteria Aspek Lingkungan.....	61
Gambar 4. 15 Penilaian Teknologi pada Aspek Teknis	61
Gambar 4. 16 Penilaian Teknologi pada Aspek Lingkungan .	62
Gambar 4. 17 Penilaian Teknologi Pengelolaan Emisi Gas Metan.....	62
Gambar 4. 18 Perbandingan Teknologi Lisrik dan Flare pada Aspek Teknis.....	63
Gambar 4. 19 Perbandingan Teknologi Listrik dan Biogas pada Aspek Teknis.....	64
Gambar 4. 20 Perbandingan Teknologi Flare dan Biogas pada Aspek Teknis.....	65
Gambar 4. 21 Perbandingan Teknologi Listrik dan Flare pada Aspek Lingkungan	66

Gambar 4. 22 Perbandingan Teknologi Listrik dan Biogas pada Aspek Lingkungan	66
Gambar 4. 23 Perbandingan Teknologi Biogas dan <i>Flare</i> pada Aspek Lingkungan	67
Gambar 4. 24 Penimbunan Sampah di TPA	71
Gambar 4. 25 Teknologi Water Scrubbing	72
Gambar 4. 26 Teknologi <i>Internal Combustion Engine</i>	73
Gambar 4. 27 Teknologi <i>Flaring</i>	74

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Degradasi Sampah.....	11
Tabel 2. 2 Komposisi Sampah Default IPCC Kawasan Asia Tenggara	14
Tabel 2. 3 Nilai DOC IPCC	15
Tabel 2. 4 <i>Methane Correction Factor</i>	16
Tabel 4. 1 Komposisi Sampah TPA Benowo.....	29
Tabel 4. 2 Sampah Masuk ke TPA Benowo	30
Tabel 4. 3 Sampah Masuk TPA Benowo per Tahun	30
Tabel 4. 4 Proyeksi Timbulan Sampah	31
Tabel 4. 5 Emisi Gas Metan Skenario 1	34
Tabel 4. 6 Emisi Gas Metan berdasarkan Komposisi Sampah	35
Tabel 4. 7 Reduksi Sampah di Sumber.....	36
Tabel 4. 8 Sampah Skenario 2 Reduksi 1.....	39
Tabel 4. 9 Sampah Skenario 2 Reduksi 2.....	40
Tabel 4. 10 Sampah Skenario 3 Reduksi 1.....	46
Tabel 4. 11 Sampah Skenario 3 Reduksi 2.....	47
Tabel 4. 12 <i>Moisture</i> sampah	52
Tabel 4. 13 Persentase C, H, O, N, S, dan Abu.....	53
Tabel 4. 14 Konversi Gas Metan menjadi Listrik Berdasarkan EPA	68
Tabel 4. 15 Konversi Gas Metan menjadi Listrik.....	70

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan Emisi Gas Metan per Skenario	83
Lampiran 2 Kuosioner Responden.....	88
Lampiran 3 Konversi Gas Metan menjadi Listrik.....	98

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Degradasi merupakan proses penguraian sampah menjadi kondisi yang stabil. Proses degradasi merubah sampah sehingga menghasilkan gas metan, gas nitrogen, gas karbondioksida lindi, dan juga kompos. Proses degradasi sampah kota dengan menggunakan mikroba terbagi dalam dua cara, yaitu secara aerob (dengan supply udara yang cukup) dan anaerob (tanpa udara). Pada proses degradasi secara aerob akan dihasilkan gas CO₂ dengan waktu degradasi yang relatif singkat, sedangkan pada degradasi secara anaerob disamping dihasilkan gas CO₂ juga dihasilkan gas CH₄ dengan waktu degradasi yang lebih lama. (Tchobanoglous dkk., 1993).

Gas metan memiliki sifat tidak berbau, tidak berwarna, dan mudah untuk terbakar sehingga dapat menimbulkan ledakan dan kebakaran pada *landfill* jika berada di udara dengan konsentrasi sebesar 5-15% (NIST, 2010). Metan mampu menyerap dan meneruskan radiasi sinar matahari namun memantulkan kembali radiasi gelombang panjang yang dipaparkan dari permukaan bumi sehingga dapat mengakibatkan terjadinya kenaikan pada suhu bumi (PUSARPEDAL, 2011). Gas metan yang dihasilkan dari proses degradasi sampah dari *landfill* memiliki kemampuan sebagai gas rumah kaca lebih kuat 25 kali daripada gas CO₂. Menurut IPCC (2006) sektor limbah menyumbangkan gas rumah kaca ke atmosfer dimana khusus dari TPA - TPA sampah yang ada berkontribusi antara 3 – 4 % dari emisi gas rumah kaca global. Walau terdapat banyak jenis gas rumah kaca dari sektor persampahan ini, namun yang dianggap dominan dan harus ada dalam setiap laporan *National GHGs Inventory* adalah CO₂, CH₄ dan N₂O.

Gas dari *landfill* secara tipikal mengandung 45%-60% metan dan 40%-60% karbondioksida. Pengelolaan sampah diestimasikan menjadi ketiga terbesar sebagai sumber dari

emisi gas metan di Amerika Serikat (EPA, 2010). Di eropa, estimasi sebesar 30% emisi gas metan disebabkan karena *landfill* (EEA, 2014). Pada tahun 2010, emisi gas metan secara global dari *landfill* diperkirakan kurang lebih 11% dari total emisi gas methan (EPA, 2014) dan emisi ini diproyeksikan terus meningkat hingga 13% antara tahun 2010 dan tahun 2030. Gas metan dari sektor persampahan di Indonesia memproduksi 109,96 Gigagram/tahun dimana terdapat 400 TPA yang hampir semuanya beroperasi secara open dumping diakibatkan oleh kondisi TPA di Indonesia yang cenderung basah dan komposisi sampah organik yang hampir 60%-70% (Purwanta, 2009). Gas hasil dari *landfill* dapat membahayakan bagi masyarakat dikarenakan mudah terbakar akibat adanya kandungan metan dan mudah menyala apabila berada dalam tempat yang tertutup. (Gell dkk., 2011)

Gas dari *landfill* memiliki potensi untuk digunakan sebagai energi sehingga menjadi beberapa subjek penelitian akhir ini. Pengukuran emisi gas rumah kaca dalam hal ini gas metan dan karbondioksida dapat merepresentasikan kondisi *landfill* untuk mengevaluasi efisiensi dari sistem *recovery* gas di *landfill* (Scheutz dkk., 2011). Penelitian yang dilakukan oleh Scarlet dkk (2015) mengukur seluruh potensi dari energi yang diperoleh dari sampah di Afrika sehingga apabila dikelola oleh pemerintah Afrika maka dapat menjadi energi baru yang diinginkan orang banyak. Ahmed dkk (2015) mengestimasi gas dari *landfill* yang ditangkap dan diolah dapat menjadi energi terbarukan. Penelitian yang dilakukan di Iskandar Malaysia ini menggunakan metode IPCC dan mendapatkan hasil bahwa pertahun *landfill* gas yang terproduksi sebesar 17.200 ton dan dapat digunakan untuk pembangkit listrik yang ekonomis dan ramah lingkungan. Indonesia telah menetapkan perencanaan agar dapat menurunkan emisi dari gas rumah kaca sebesar 26% dari kegiatan yang menghasilkan gas rumah kaca di Indonesia terutama pada sektor limbah pada tahun 2010-2020 (RAN, 2010).

Pemrosesan akhir sampah di Kota Surabaya menggunakan sistem *landfilling* yang terletak di daerah Benowo. Jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo sebesar 1200 ton/hari. Komposisi terbesar dari sampah yang masuk ke TPA Benowo yaitu sampah basah 71% dengan rincian 67,25% berupa sampah sisa makanan dan sampah kebun 4,71% , plastik sebesar 12,95%, dan sampah plastik dan kardus sebesar 5,35%. TPA Benowo menggunakan sistem *controlled landfill* dengan penutupan sampah menggunakan tanah penutup dilakukan saat timbunan sampah penuh. Gas rumah kaca yang diemisikan pada tahun 2013 sebesar 191.000 ton CO₂ ekuivalen/ton sampah, asidifikasi 47,3 ton SO₂ ekuivalen/ton sampah, dan eutrofikasi 1320 ton PO₄ ekuivalen/ton sampah (Anvaria dkk., 2013).

1.2 Perumusan Masalah

1. Emisi gas metan yang dihasilkan dari proses penimbunan sampah di TPA Benowo.
2. Pengelolaan emisi gas metan hasil dari proses penimbunan sampah di TPA Benowo yang baik.

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Memproyeksikan emisi gas metan dari proses degradasi sampah di TPA Benowo.
2. Memilih program untuk mengelola emisi gas metan di TPA Benowo.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pada tugas akhir ini adalah

1. Tempat dilaksanakannya penelitian ini adalah di TPA Benowo, Surabaya.
2. Penelitian dilakukan menggunakan data primer dan data sekunder.
3. Data diperoleh dengan cara penelitian lapangan dan perhitungan.
4. Emisi gas rumah kaca yang dihitung adalah gas metan dari proses penimbunan sampah.

5. Metode yang digunakan untuk mengukur emisi gas rumah metan yaitu IPCC *Guidelines* 2006 dengan *template* pada *excel*.
6. Metode untuk menentukan program pengelolaan emisi gas rumah metan yaitu menggunakan metode AHP dengan *software Expert Choice 2011*.
7. Pemilihan pengelolaan emisi gas rumah kaca yang akan diberikan mempertimbangkan aspek teknis dan lingkungan.

1.5 Manfaat Tugas Akhir

1. Memberikan informasi dan pengetahuan terkait kegiatan penimbunan sampah dan efeknya bagi lingkungan yang ada di TPA Benowo
2. Memberikan program pengelolaan emisi gas rumah kaca di TPA Benowo.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Sampah

Sampah adalah bahan buangan padat atau semi padat yang dihasilkan dari aktifitas manusia atau hewan yang dibuang karena tidak diinginkan atau digunakan lagi. (Tchobanoglous dkk., 1993)

Pengertian Sampah berdasarkan UU No.18 Tahun 2008 merupakan sisa kegiatan sehari-hari manusia dan atau proses alam yang berbentuk padat. Sampah yang dikelola terdiri atas sampah rumah tangga, sampah sejenis sampah rumah tangga, dan sampah spesifik. Sampah rumah tangga berasal dari kegiatan sehari-hari dalam rumah tangga tidak termasuk tinja dan sampah spesifik. Sampah sejenis sampah rumah tangga berasal dari kawasan komersial, kawasan industri, kawasan khusus, fasilitas sosial, fasilitas umum, dan lain-lain. Sampah spesifik yaitu sampah yang mengandung bahan berbahaya dan beracun, sampah yang timbul akibat bencana, sampah bongkaran bangunan, dan sampah yang timbul secara tidak periodik.

2.2 Sumber-sumber Sampah

Sumber-sumber sampah pada umumnya dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Tchobanoglous dkk., 1993) :

- a) Daerah Permukiman (Rumah Tangga)
Bersumber dari aktifitas rumah atau dapur. Jenis sampah yang dihasilkan berupa sampah basah dan sampah kering atau debu.
- b) Daerah Komersial
Bersumber dari pasar, pertokoan restoran, perusahaan, dan lain-lain. Sebagian besar kategori sampah ini berasal dari pasar dan kebanyakan berupa sampah organik.
- c) Daerah Institusi
Sumber sampah institusional adalah perkantoran, sekolah, tempat ibadah, dan lembaga non komersial lainnya. Jenis sampah yang dihasilkan sebagian besar sampah kering.
- d) Sampah jalan dan tempat-tempat terbuka

Sampah kategori ini berasal dari kegiatan penyapuan-penyapuan jalan, trotoar, dan taman. Jenis sampah didominasi sampah organik (daun) dan debu.

- e) Industri
Sumber sampah industri berasal dari perusahaan yang bergerak di bidang industri berat, industri ringan, pabrik, dan lain-lain. Jenis sampah yang dihasilkan tergantung dari bahan baku yang digunakan oleh industri tersebut.
- f) Tempat pembangunan, pemugaran, dan pembongkaran
Sampah yang dijumpai adalah sampah material atau bahan-bahan bangunan. Jenisnya tergantung dari bahan bangunan yang dipakai (bata, pecahan beton, kayu, besi beton, dan lain-lain).
- g) Rumah sakit dan balai pengobatan
Sampah rumah sakit pengelolaannya ditangani secara terpisah dengan sampah lainnya karena sampahnya bersifat khusus, kemungkinan mengandung kuman penyakit menular. Sampah yang dihasilkan berupa bekas-bekas operasi, pembalut luka, potongan anatomi, di samping sampah dapur dan kantor. Sampah ini wajib dibakar (pengolahan untuk menghilangkan kuman patogenik).
- h) Sampah Industri (*Industrial Waste*)
Sampah yang berasal dari kegiatan industri. Limbah ini sangat tergantung dari jenis industrinya. Semakin banyak yang berdiri akan semakin banyak beragam limbahnya.

2.3 Klasifikasi Sampah

Berdasarkan komposisi sampah, karakteristik sampah dapat dibedakan sebagai berikut (Peavy, 1995) :

- a) Komposisi Fisik
Informasi dan data komposisi sampah meliputi besarnya prosentase komponen pembentukan sampah, ukuran partikel, kandungan air, dan kepadatan sampah. Komposisi fisik sampah tidak hanya dalam % berat, tetapi juga dinyatakan dalam % volume dari komponen organik dan anorganik.
- b) Komposisi Kimia

Informasi komposisi kimia sampah sangat penting dalam mengevaluasi proses alternatif dan pilihan pemulihan energi. Jika sampah digunakan sebagai bahan bakar, komponen yang harus diketahui adalah analisa proksimasi (kandungan air, kandungan bahan volatil, kandungan abu, dan kandungan karbon tetap), titik abu sampah, analisis ultimasi (Prosentase C, H, O, N, S, dan abu), dan besarnya energi.

c) Komposisi Biologis

Komposisi biologis dapat dibedakan menjadi beberapa bagian sebagai berikut:

1. Kandungan terlarut seperti gula, asam amino, dan berbagai macam asam organik.
2. Hemiselulosa yaitu hasil penguraian gula.
3. Selulosa yaitu hasil penguraian glukosa.
4. Lemak, minyak, lilin.
5. Lignin, material polimer yang terdiri dari cincin aromatik dengan gugus methoksil. Biasanya terdapat pada produk kertas seperti kertas koran dan *fiberboard*.
6. Ligninselulosa yaitu kombinasi dari lignin dan selulosa.
7. Protein yang terdiri dari rantai asam amino.

Klasifikasi sampah berdasarkan jenis sampah di negara industri (Damanhuri dan Padmi, 2010) antara lain:

1. Sampah Organik mudah busuk (*garbage*) : sampah sisa dapur, sisa makanan, sampah sisa sayur dan kulit buah buahan.
2. Sampah organik tak membusuk (*rubbish*) : mudah terbakar (*combustible*) seperti kertas karton, plastik, dsb dan tidak mudah terbakar (*non combustible*) seperti logam, kaleng, kaca.
3. Sampah bangkai binatang (*dead animal*) : Bangkai tikus, ikan, anjing, dan binatang ternak
4. Sampah sisa abu pembakaran penghangat rumah (*ashes*)
5. Sampah sapuan jalan (*street sweeping*) : sisa sisa pembungkus dan sisa sisa makanan, kertas, dan daun.
6. Sampah buangan sisa kontruksi (*demolition waste*)

Komposisi adalah gambaran komponen secara individual yang membentuk sampah dan juga penyebarannya dan

dinyatakan dalam satuan persen (%) berat (Tchnobanoglous, 1993). Komposisi sampah dipengaruhi beberapa factor antara lain cuaca, frekuensi pengumpulan, musim, tingkat social ekonomi, serta pendapatan perkapita (Damanhuri dan Padmi, 2010). Komposisi sampah dapat dihitung dengan cara yang ada di SNI 19-3964-1994 dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\% \text{ Jenis Sampah} = \frac{\text{Jenis sampah (kg)}}{\text{Berat sampah (100 kg)}} \times 100 \% \dots\dots 2.1$$

2.4 Timbulan sampah

Timbulan sampah adalah banyaknya sampah yang timbul dari masyarakat dalam satuan *volume* ataupun berat perkapita per hari, atau perluas bangunan atau perpanjangan jalan (SNI 19-2454-2002). Besaran timbulan sampah menurut SNI 19-3983-1995 untuk kota sedang memiliki laju timbulan *volume* 2,75 – 3,25 L/orang/hari dan berat 0,7–0,8 kg/orang/hari sedangkan untuk kota kecil memiliki laju timbulan *volume* 2,5 – 2,75 L/orang/hari dan berat 0,625 – 0,7 kg/orang/hari. Laju timbulan sampah domestik di Kota Surabaya adalah 3 liter/orang/hari (PPSP, 2011).

2.5 Tempat Pemrosesan Akhir Sampah

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 81 tahun 2012 tentang pengelolaan sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga menjelaskan bahwa yang dimaksud dengan pemrosesan akhir sampah adalah kegiatan mengendalikan sampah dan/atau residu hasil pengelolaan sebelumnya kemedi lingkungan secara aman. Pemrosesan akhir sampah dilakukan dengan cara:

1. Metode lahan urug terkendali

Metode pengurugan dengan cara dipadatkan dan ditutup dengan tanah penutup sekurang kurangnya setiap tujuh hari. Metode ini merupakan metode yang bersifat antara sebelum mampu menetapkan metode lahan urug saniter (PERMENPU No 3, 2013).

2. Metode lahan urug saniter

Metode pengurugan di areal pengurugan sampah yang disiapkan dan dioperasikan secara sistematis dengan penyebaran

dan pemadatan sampah pada area pengurugan serta penutupan sampah setiap hari. (PERMENPU No 3, 2013).

Metode untuk melakukan *landfilling* sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga (Tchobanoglous dkk., 1993) yaitu:

1. Metode *Trench*

Metode ini cocok untuk lahan yang memiliki material penutup yang memiliki kedalaman air tanah yang jauh dari permukaan tanah. Tanah yang ada di lahan diurug lalu dijadikan sebagai tanah penutup timbunan sampah.

2. Metode *Area*

Metode ini dipilih apabila lahan yang dipilih tidak bisa diurug. Pemilihan metode ini juga disebabkan karena tingginya permukaan air tanah. Material tanah penutup harus diangkat oleh *haul truck* agar bisa menutupi timbunan sampah.

3. Metode *Depression/ Tebing*

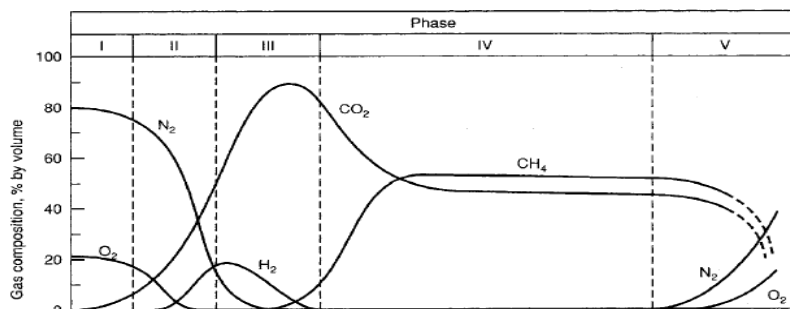
Tebing, jurang, dan lahan bekas pertambangan dapat digunakan untuk penimbunan sampah. Metode ini menempatkan sampah pada dinding tebing ataupun jurang tersebut lalu dipadatkan sesuai dengan geografis dari lahan penimbunan.

2.7 Proses Degradasi Sampah

Sampah di landfill secara seksama dan berelasi berubah bentuk secara biologis, kimiawi, dan fisik (Wakadikar dkk., 2012). Berbagai macam reaksi terjadi di dalam landfill memiliki beberapa factor dan parameter antara lain kondisi lahan, karakteristik sampah, dan kondisi iklim termasuk oksigen, temperature, kelembapan, dan juga nutrient. Proses degradasi sampah di atas dapat dibagi dalam beberapa tahap berikut:

- a. Fase I (Hidrolisis)
- b. Fase II (Asidogenesis)
- c. Fase III (Acetogenesis)
- d. Fase IV (Metanogenesis)
- e. Fase V Kematangan

Produksi gas pada proses degradasi sampah di *landfill* dapat dilihat pada gambar 2.1



Gambar 2. 1 Proses Degradasi Sampah

Pembentukan Gas bergantung pada komposisi sampah yang ditimbun. Timbulan gas landfill akan dihitung berdasarkan berat kering masing-masing komposisi sampah. Degradasi sampah tidak langsung mulai saat segera ditimbun tapi ada jeda waktunya. Degradasi sampah mempunyai dua tipe yaitu tipe cepat terurai dan tipe lambat terurai. Degradasi akan berakhir kurang lebih 50 tahun (IPCC, 2006).

2.8 Produksi Gas

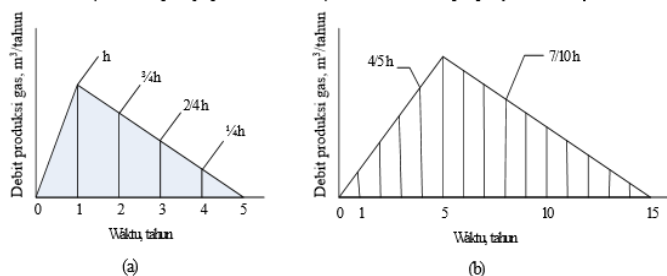
Produksi gas yang dihasilkan pada landfill sangat bergantung dari komposisi sampah yang ada. Timbulan gas landfill akan dihitung berdasarkan berat kering masing masing komposisi sampah. Secara teoritis berdasarkan reaksi kimia ini maka gas CH₄ dan CO₂ merupakan gas yang paling dominan dihasilkan (Tchobanoglous dkk., 1993). Jumlah atau produksi gas yang dihasilkan sangat tergantung dari beberapa faktor yaitu unsur-unsur pembentukan sampah seperti karbon, hidrogen dan nitrogen serta oksigen yang diperoleh dari analisis karakteristik sampah yaitu ultimate analysis.

Tergantung dari kecepatan degradasi sampah yang dibedakan atas sampah yang cepat terurai dan lambat terurai. Waktu untuk penguraian bahan organik yg mudah terurai adalah 5 tahun, sedangkan waktu penguraian bahan organik yang lambat terurai adalah 15 tahun. Selanjutnya proses perhitungan produksi

gas dilakukan menggunakan metode segitiga. Sampah degradasi cepat yaitu sampah makanan dan kertas sedangkan sampah lambat terurai contohnya adalah plastik, kain, dan karet. Gas yang dihasilkan selama proses degradasi tidak boleh lepas begitu saja ke udara karena gas metan yang dihasilkan jika kontak dengan udara $> 5\%$ akan menimbulkan ledakan, sehingga diperlukan kontrol dan monitoring terhadap Landfill gas. Kontrol gas secara umum dapat dilakukan dengan pembakaran gas atau memanfaatkan sebagai sumber energi. Terutama untuk gas metan bisa dimanfaatkan sumber energi yang sangat potensial. Penjelasan lebih lanjut dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan Gambar 2.2.

Tabel 2. 1 Degradasi Sampah

Jenis Sampah	Cepat Terurai	Lambat Terurai
Basah (makanan)	✓	
Kertas	✓	
Plastik		✓
Kain		✓
Karet		✓
Kayu		✓
Lain-lain		✓



Gambar 2. 2 Perhitungan gas menggunakan model segitiga
Cepat terurai dan b.) Lambat terurai

Ketika gas mulai dihasilkan maka tekanan di dalam *landfill* akan meningkat sehingga memungkinkan adanya pergerakan gas di dalam *landfill*. Pergerakan gas bisa terjadi secara vertikal dan horisontal, jika tekanan diluar (barometrik) lebih kecil dibandingkan tekanan di dalam maka gas akan cenderung bergerak ke arah vertikal dan keluar, sedangkan jika tekanan diluar lebih besar maka gas cenderung bertahan di dalam *landfill*, sampai mencapai keseimbangan tekanan. Pergerakan gas sangat sulit untuk diprediksikan dari beberapa penelitian diketahui pergerakan gas metan ke arah horisontal dapat mencapai jarak lebih dari 1500 feet.

Landfill menghasilkan gas akibat terjadinya proses degradasi *anaerobic* dari sampah *biodegradable*. Komponen utama yang dihasilkan yaitu *Methane* (CH_4) dan juga *Carbon dioxide* (CO_2). Metan (CH_4) lebih diperhatikan karena merupakan gas rumah kaca dan juga memiliki potensi kekuatan 21 kali lebih kuat dari pada *Carbon dioxide* (CO_2) (Marten dan Newbold, 2012). IPCC (2006) mengatakan bahwa karbondioksida yang diemisikan dari pengelolaan limbah padat secara biologis tidak termasuk dalam inventarisasi gas rumah kaca dari TPA dikarenakan karbondioksida dikategorikan sebagai *biogenic origin* dan dihitung sebagai *net emission*. Gas lain yang dihasilkan juga tidak dihitung dikarenakan tidak signifikan besarnya.

2.9 Karakteristik Emisi CH_4

Metan adalah molekul sederhana yang terdiri dari suatu karbon dikelilingi oleh 4 atom hydrogen dan dibentuk dengan hampir sebagian besar bakteri yang memakan material organik. Dalam kondisi kering, banyak terdapat oksigen dan bakteri aerob yang menghasilkan karbon dioksida. Di daerah yang basah seperti rawa, tanah basah dan lautan tidak ada oksigen yang cukup dan juga hidrokarbon akan hancur menjadi metan dengan bantuan bakteri anaerob. Beberapa dari gas metan ini akan terperangkap sebagai gas, padatan, terlarut, termakan, dan beberapa akan menuju atmosfer dimana akan pecah menjadi CO_2 dan uap air dalam serangkaian reaksi kimia.

Karakteristik utama dari gas ini adalah bersifat *flammable* (mudah terbakar) dan juga rentan saat bercampur dengan udara

dengan konsentrasi diatas 5% (Bestar, 2012). Gas metan juga memiliki sifat tidak berwarna, tidak berbau, mudah terbakar (Fairus dkk., 2011) dan setiap kilogram sampah dapat memproduksi 0,5 m³ gas metan dan sumbangannya terhadap pemanasan global sebesar 15% (Sudarman, 2010).

2.10 Perhitungan Emisi Karbon dengan Rumus IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

2.10.1 Penentuan Metode Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca

Metodologi perhitungan emisi gas rumah kaca dari tumpukan sampah di TPA dapat diklasifikasikan berdasarkan tingkat ketelitiannya sebagai berikut :

- Tier 1: penghitungan berdasarkan metoda *First Order Decay* (FOD) yang sebagian besar menggunakan angka *default* untuk data aktivitas dan faktor emisi (FE);

- Tier 2: penghitungan berdasarkan metoda FOD yang telah menggunakan data aktivitas yang lebih akurat dalam hal ini *country specific* (berdasarkan data historis 10 tahun terakhir atau lebih) untuk memperbaiki kualitas inventarisasi meskipun masih menggunakan angka default terutama untuk FE;

- Tier 3: penghitungan berdasarkan metoda FOD yang didasari data-data yang lebih akurat baik dalam hal data aktivitas yang telah menggunakan *country specific* dengan parameter-parameter kunci yang telah dikembangkan secara nasional dan FE local

Faktor emisi ditentukan berdasarkan penelitian dan sangat spesifik untuk setiap bahan atau produk. Indonesia belum memiliki faktor emisi yang spesifik sehingga untuk perhitungan kali ini akan menggunakan faktor emisi yang sudah ditentukan oleh IPCC.

2.10.2 Emisi GRK dalam satu tahun

Dalam menghitung emisi CH₄ (IPCC, 2006) digunakan rumus dalam persamaan 2.2.

Emisi CH₄ pada tahun T, Gigagram = $[\sum x \text{ CH}_4 \text{ generated }_{x,T} - R_T] \times (1-0X) \dots\dots\dots 2.2$

Keterangan :

$\Sigma CH_{4\text{generated}}$ = CH_4 yang terbentuk pada satu tahun hasil degradasi organik jenis tertentu yang terseimpan dalam sampah (DDOC)

R = Recovery CH_4 di TPA

OX = Faktor Oksidasi

Untuk mengetahui besarnya $CH_4 \text{ generated}_{x.T}$ maka diperlukan perhitungan untuk mengukur potensi metan yang akan terbentuk dengan persamaan 2.3

$$CH_{4\text{generated}_{x.T}} = DDOC_{mdecomp} \times F \times \frac{16}{12} \dots \dots \dots 2.3$$

$CH_4, \text{ generated } T$ = CH_4 yang terbentuk pada tahun T hasil dekomposisi komponen organik yang tersimpah di dalam sampah (DDOC)

$DDOC_{mdecomp} T$ = DDOCm yang terdekomposisi pada tahun T , Gg

DDOCm = Massa DOC (komponen karbon organik yang dapat terdekomposisi) yang tersimpan pada sampah di TPA, Gg

F = Fraksi (%-volume) CH_4 pada gas land fill yang ditimbulkan

Tabel 2. 2 Komposisi Sampah Default IPCC Kawasan Asia Tenggara

Komponen Sampah	Komposisi sampah, % berat basah			
	*Sumatera Selatan	*Sumatera Utara	Rata-Rata	IPCC 2006 Guidelines (*) (South East Asia Region)
a. Makanan	59%	50%	54%	43.5%
b. Kertas + karton + Nappies	15%	13%	14%	12.9%
d. Kayu	3%	14%	9%	9.9%
e. Kain + produk tekstil	2%	3%	2%	2.7%
f. Karet dan kulit	0%	1%	0%	0.9%
g. Plastik	19%	10%	15%	7.2%
h. Logam	0%	0%	0%	3.3%
i. Gelas	1%	1%	1%	4.0%
j. Lain-lain	0%	7%	3%	16.3%
TOTAL	100%	100%	100%	100%

Sumber: Manual survey komposisi sampah dan dry matter content [Pilot Project JICA-KLH-ITB, BLH Sumatera Utara, BLH Sumatera Selatan, 2011], *diolah dari 4th Technical Training on the Pilot Project - Waste Sector (Palembang, 19 Desember 2011 dan Medan, 15 Desember 2011)

Data pertama yang harus dikumpulkan adalah terkait komposisi sampah. Komposisi sampah tiap kota dan negara berbeda dengan lainnya. Komposisi sampah menurut IPCC *Guideline 2006* dibagi menjadi sampah dapur atau makanan, kertas dan karton, popok dan pembalut, kayu dan sampah taman, kain dan produk tekstil, karet dan kulit, plastik, logam, gelas, dan lain lain. Komposisi sampah Asia Tenggara berdasarkan *default* IPCC dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Degradable Organic Carbon menjadi salah satu parameter utama dalam perhitungan menggunakan Metode IPCC dan memiliki perbedaan untuk masing masing sampah. DOC adalah karakteristik dari sampah yang menentukan seberapa besar gas metan yang dapat terproduksi dari proses degradasi sampah. Indonesia belum memiliki data terkait DOC sehingga perhitungan dilakukan menggunakan DOC *default* IPCC. Nilai besarnya DOC dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Nilai DOC IPCC

DOC	
Food Waste	0,15
Garden	0,2
Paper	0,4
Wood	0,43
Textile	0,24
Disposable Nappies	0,24

Methane Correction Factor (MCF) atau angka koreksi metan merupakan sebuah nilai yang mendeskripsikan tingkat dan karakteristik dari TPA tersebut. IPCC membagi tipe tipe TPA menjadi lima tipe berdasarkan proses yang terjadi, kedalaman muka air, dan tidak dikategorikan. MCF dibagi menjadi lima dengan karakteristik dengan penjelasannya yang berbeda beda. Penjelasan terkait *Methane Correction Factor* dan nilainya untuk masing masing kriteria dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Methane Correction Factor

Tipe TPA	Nilai	Keterangan
<i>Managed Anaerobic</i>	1	Memiliki salah satu dari kriteria yaitu punya lapisan penutup, dikompaksi, atau sampah yang bertingkat
<i>Managed Semi aerobic</i>	0,5	Memiliki material penutup <i>permeable</i> , sistem pengaliran lindi, dan sistem ventilasi gas
<i>Unmanaged deep >5m</i>	0,8	Tidak memenuhi kriteria dan dalam
<i>Unmanaged shallow <5m</i>	0,4	Tidak memenuhi kriteria dan dangkal
<i>Uncategorized</i>	0,6	Tidak dapat dikategorikan

Oxidation Factor (OX) atau faktor oksidasi merupakan nilai yang menggambarkan besarnya metan yang teroksidasi oleh material penutup yang mengandung mikroorganisme *methanotropic*. *OX* memiliki dua variasi yaitu:

- Tidak tertutup material penutup memiliki nilai *OX* 0.
- Memiliki material penutup seperti tanah atau kompos maka nilai *OX* adalah 0,1.

2.11 Analytical Hierarchy Process

Pengambilan keputusan menggunakan metode AHP ditemukan oleh Thomas L. Saaty. Model ini adalah dari suatu masalah diuraikan secara multi kriteria atau multi faktor yang kompleks menjadi suatu hirarki. Hirarki didefinisikan sebagai suatu representasi dari sebuah permasalahan yang kompleks dalam suatu struktur multilevel dimana level pertama adalah tujuan, yang diikuti dengan level faktor, kriteria, sub kriteria, dan seterusnya hingga level terakhir dari alternatif (Saaty, 1993). Dengan menggunakan metode AHP, maka nilai nilai kualitatif dapat diubah menjadi nilai nilai kuantitatif sehingga keputusan yang diambil dapat bersifat objektif. Metode ini dapat membantu untuk mengambil keputusan yang membantu kerangka berpikir manusia. (Supriyono dkk., 2007).

Proses analisis hirarki memiliki prinsip (Hamali, 2015) adalah:

1. Menyusun secara hirarki dengan memecahkan masalah dalam unsur yang terpisah. Fokus dari permasalahan dibuat dengan cara hirarkis dengan permasalahan utama dijadikan sebagai prioritas.
2. Menentukan prioritas menggunakan peringkat elemen – elemen menurut relatif pentingnya. Dalam penilaian kepentingan relative dua elemen berlaku aksioma berbalikan (*reciprocal*) yakni jika A dinilai 3 kali B maka otomatis B adalah sepertiga A. Dalam bahasa matematika yaitu $A = 3B$ atau $B = 1/3 A$.
3. Mengukur konsistensi logis yang menjamin bahwa semua elemen dikelompokkan secara logis dan diperingkatkan secara konsisten sesuai dengan kriteria yang logis. AHP mencakup pengukuran konsistensi yaitu dimana pemberian nilai dalam perbandingan antar objek telah dilakukan secara konsisten. Hasil analisis dianggap konsisten jika memiliki CR 10%. Jika nilai CR > 10% maka perlu dipertimbangkan untuk melakukan reevaluasi dalam penyusunan matriks perbandingan.
4. Pada setiap pertanyaan, terdapat 2 kriteria yang akan dibandingkan untuk mengetahui skala kepentingannya. Semakin tinggi angka skala yang dipilih, berarti tingkat kepentingan kriteria tersebut juga semakin besar. Definisi angka skala :
 - 1 : kedua kriteria sama penting
 - 3 : kriteria sedikit lebih penting dibanding kriteria perbandingannya
 - 5 : kriteria lebih penting dibanding kriteria perbandingannya
 - 7 : kriteria sangat lebih penting dibanding kriteria perbandingannya
 - 9 : kriteria mutlak lebih penting dibanding kriteria perbandingannya
 - 2,4,6,8 : nilai tengah

2.12 Expert Choice

Expert Choice merupakan *software* membantu dalam memilih suatu pilihan yang memiliki berbagai macam kriteria dan

pertimbangan berdasarkan teori matematika yang ditemukan oleh Thomas Saaty di tahun 1977. *Expert Choice* mampu digunakan secara individual sesuai dengan versi 2000 atau secara grup minimum terdiri dari tiga orang sesuai dengan versi 2011. Langkah penggunaan *Expert Choice 2011* yaitu:

1. Membuat struktur dari hierarki permasalahan
2. Mengaktifkan mode grup
3. Lakukan penilaian pembobotan tujuan, kriteria, dan sub kriteria secara *pair wise comparison*
4. *Input* data dari kuisioner kedalam *Expert Choice*
5. Melakukan sintesis untuk mendapatkan alternatif terbaik
6. Lakukan analisis sensitifitas
7. *Export* data menjadi hasil

Expert Choice mampu membantu suatu grup untuk menentukan tujuan, kriteria, subkriteria, dan alternatif terbaik yang akan disusun dalam pohon hierarki. Hasil akhir dari *Expert Choice* adalah mensintesis hasil dari masing masing partisipan dan menjadi sebuah satu kesimpulan yang utuh. Hasil dapat dicek sensitifitasnya menggunakan 4 grafik yaitu *dynamic sensitivity*, *performance sensitivity*, *head to head sensitivity*, dan *2D sensitivity*. Jika terjadi inkonsistensi pada salah satu partisipan, maka partisipan dapat mengulang dan mengganti jawabannya agar menjadi konsisten (Barfod, 2017).

2.13 Pengelolaan Gas TPA

Emisi dari *landfill* modern mengalir melalui sistem manajemen gas di *landfill* dan pada permukaan *landfill*. Pengelolaan gas *landfill* meliputi pembakaran tertutup atau pembangkit listrik dapat menghancurkan metan dan *volatile organic compound* di dalam gas *landfill*, namun menghasilkan produk sampingan hasil pembakaran (SEPA, 2004).

Gas dari *landfill* dapat digunakan secara langsung atau untuk pembangkit listrik. Penggunaan secara langsung dengan cara memproduksi uap atau air panas untuk proses produksi barang, bahan bakar pemanas *furnace* dan *dryer*, pemanas ruangan, dan mengevaporasikan lindi dari *landfill* yang berguna agar biaya pengolahan lindi menjadi semakin murah. Pembangkit listrik

tenaga gas dari *landfill* dapat digunakan untuk energi mesin pembakar dan turbin gas yang menghasilkan listrik kembali (GMI, 2012).

Gas dari *landfill* membutuhkan pembersihan sebelum digunakan sebagai sumber energi terbarukan. Pembersihan diperlukan untuk menurunkan kadar air dan menghilangkan kontaminan yang terkandung di gas dalam rangka pencegahan korosi dari alat dan sistem (Rajaram dkk., 2012). Beberapa pengolahan gas yang ada di TPA antara lain *flaring*, pemurnian untuk menjadi biogas, dan konversi menjadi listrik.

Flaring digunakan untuk membakar gas metan dan karbondioksida sehingga menjadi gas yang tidak berbahaya bagi lingkungan. Sistem *enclosed flare* membutuhkan suhu 1000°C dan harus dipertahankan dalam jangka waktu yang lama (Damanhuri dan Padmi, 2010).

Metode pemurnian biogas dalam hal ini biogas menggunakan metode penyerapan karbondioksida dengan air. Teknologi ini didesain untuk menyerap karbondioksida yang ada di dalam 40% kandungan biogas sehingga presentase gas metana naik dari 60% hingga >95% (Uusitalo dkk., 2013). Gas jernih hasil pemurnian ini disebut dengan gas biogas. Gas biogas kemudian dimampatkan ke dalam silinder CNG untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar. Besarnya energi untuk pemrosesan pemurnian biogas dan pemampatan yaitu sebesar 25% dari total energi gas biogas yang dihasilkan perhari (Kapdi, 2006).

Proses konversi gas metan menjadi listrik diawali dari sumur pengumpul untuk memisahkan antara air dan gas metan dengan Sistem adsorpsi. Selanjutnya dialirkan menuju stasiun sistem pembakaran internal. Mesin yang menerima gas metan dibakar dengan bantuan oksidan di wadah pembakarannya. Di dalam mesin ini, ekspansi suhu tinggi dan gas tekanan tinggi yang diproduksi menerapkan gaya untuk mesinnya. Gaya ini akan menggerakkan piston, bilah turbin, atau *nozzle* (Malik dkk., 1987). Sebanyak 40% gas metan dari fraksi organik di *landfill* diasumsikan tertampung, dialirkan dan dibakar untuk

menghasilkan listrik sebesar 4,86 kWh/kg metan yang terbakar (Aye dan Widjaya, 2006)

2.14 Gambaran Umum TPA Benowo

Kota Surabaya memiliki satu buah tempat pemrosesan akhir sampah yaitu bernama TPA Benowo yang terletak di bagian Surabaya Barat dengan sistem *controlled landfill* dengan luas sebesar 37,4 Ha. Alat operasional yang digunakan di TPA Benowo yaitu 7 unit *Escavator*, 7 unit *Buldozer*, 1 unit *Dump Truck*, 3 unit *Wheel Loader*, 1 unit *Back Hoe Loader* dan 1 unit *Forklift*. Pada tahun 2011, Pemerintah Kota Surabaya telah berhasil melaksanakan proses lelang investasi dengan pihak swasta terkait rencana Pengelolaan TPA Benowo dengan mempergunakan teknologi pengolahan sampah yang ramah lingkungan, berkelanjutan dan menghasilkan produk ekonomis (Listrik) (PPSP, 2011).

Saat ini TPA Benowo dibagi dalam 5 sel penimbunan, dimana dua sel dalam tahap stabilisasi dan tiga sel lainnya masih dilakukan proses penimbunan. Total volume sampah dari dua sel tersebut kurang lebih sebesar 312.960 m³. Fasilitas yang ada di TPA Benowo saat ini adalah jembatan timbang, IPAL 1, IPAL 2, terminal dumping, bengkel alat berat, gas regulator, pompa penghisap gas, alat deteksi gas, dan lain lain. (Harianto, 2016)

BAB III

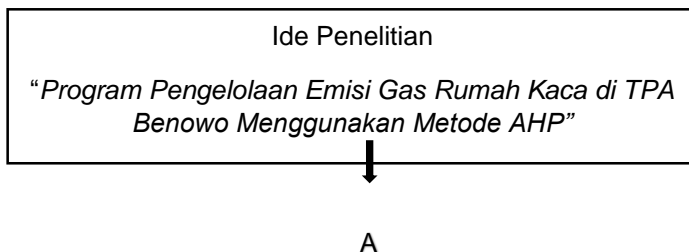
METODE PENELITIAN

3.1 Gambaran Umum

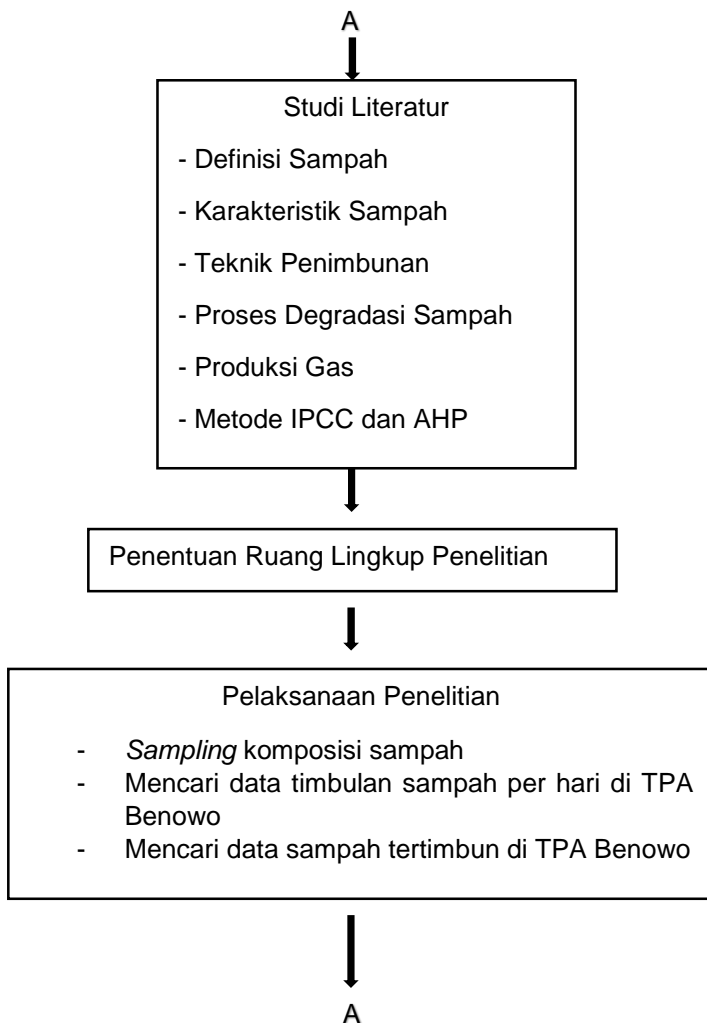
Penelitian ini memerlukan metode untuk mendapatkan hasil yang ingin dicapai. Tempat dilaksanakannya penelitian ini adalah di TPA Benowo di Kelurahan Romokalisari, Kecamatan Benowo, Kota Surabaya, Provinsi Jawa Timur. TPA Benowo saat ini dikelola oleh PT. Sumber Organik. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui emisi gas rumah kaca yang di produksi dari TPA Benowo selama penimbunan sampah serta merekomendasikan sistem pengelolaan emisi gas rumah kaca dari TPA Benowo.

3.2 Diagram Alir Kerangka Penelitian

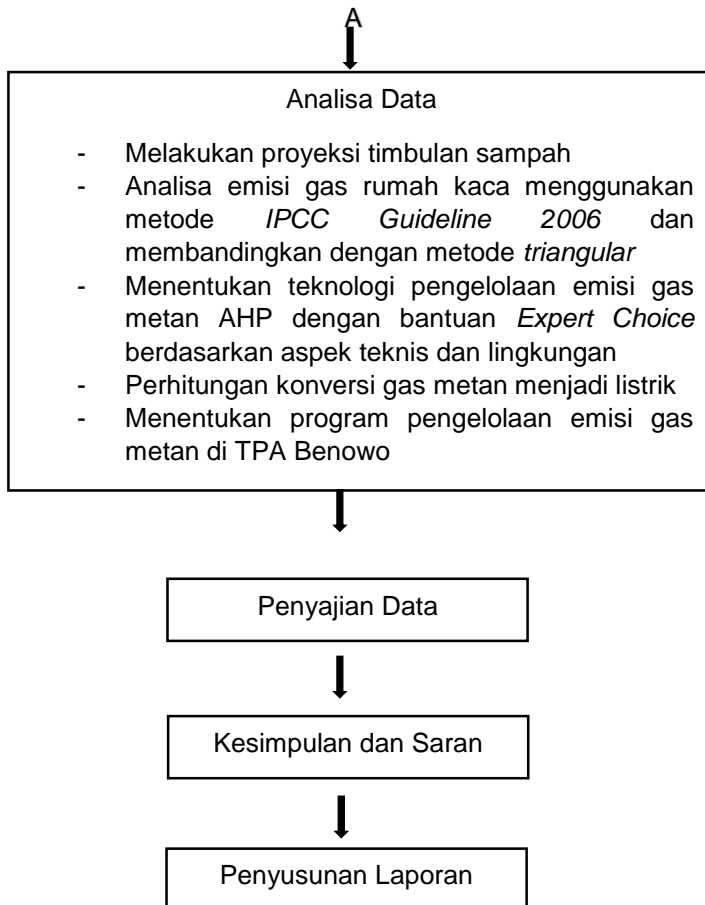
Metode penelitian disusun dalam bentuk kerangka penelitian. Kerangka penelitian berfungsi sebagai gambaran awal pelaksanaan penelitian secara sistematis sehingga memudahkan penelitian dan penulisan laporan. Kerangka penelitian dimulai dengan rumusan masalah yang menghasilkan ide penelitian. Selanjutnya, merumuskan permasalahan yang terjadi, mencari studi literatur yang mendukung pokok bahasan, pengumpulan data, simulasi model yang dibahas dalam analisa data dan pembahasan, dan menyimpulkan hasil pembahasan serta memberikan saran perbaikan. Kerangka dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian



Gambar 3. 2 Kerangka Penelitian



Gambar 3. 3 Kerangka Penelitian

3.2.1 Ide Penelitian

Proses penimbunan sampah di *landfill* berfungsi untuk mendegradasi sampah. Proses degradasi sampah menghasilkan gas metan, lindi, gas karbondioksida, dan kompos. Produksi dari proses degradasi sampah tersebut apabila tidak dikelola maka

dapat membahayakan lingkungan dan juga manusia. Berdasarkan permasalahan tersebut maka dibutuhkan suatu data untuk mengetahui besarnya emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari proses pendegradasian sampah. Data tersebut didapatkan dengan cara penelitian lapangan yang kemudian diproses menggunakan metode IPCC *Guideline* 2006 dan AHP.

3.2.2 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan mulai dari tahap awal hingga analisis data dan pembahasan dengan mengumpulkan data dan mempelajari berbagai sumber informasi. Media literatur didapatkan dari buku literatur, jurnal ilmiah, ataupun laporan penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan proses produksi sampah dan juga dampak dari produksi degradasi sampah. Literatur yang dibutuhkan untuk mengetahui diantaranya mengenai:

- a. Definisi dan karakteristik sampah
- b. Proses degradasi sampah
- c. Produksi gas
- d. Analisa menggunakan metode IPCC
- e. Metode AHP
- f. *Software Expert Choice*
- g. Teknologi pengelolaan emisi gas metan di *landfill*
- h. Konversi gas metan menjadi listrik

3.2.3 Penentuan Aspek Penelitian

Aspek yang diteliti pada penelitian ini yaitu aspek teknis dan lingkungan terkait pengelolaan emisi gas rumah kaca di TPA Benowo.

3.2.3 Persiapan Penelitian

Pada tahap persiapan ini dilakukan dua hal yaitu

1. Survey Pendahuluan

Survey pendahuluan merupakan survey untuk mengetahui bagaimana kondisi TPA Benowo dan mengetahui kondisi *existing* yang ada di tempat penelitian

2. Perizinan

Pada tahap ini dilakukan permintaan izin kepada stakeholder terkait yang berwenang pada TPA Benowo.

3.2.4 Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan untuk mendapatkan data primer dan juga data sekunder. Data yang dibutuhkan yaitu

1. Data Primer

Data primer yang dibutuhkan yaitu tentang komposisi sampah TPA Benowo.

2. Data sekunder yang digunakan adalah data sampah yang masuk ke TPA Benowo dari awal beroperasi tahun 2012 hingga tahun 2017.

3.2.5 Analisa Data

Teknik analisa data awal yang digunakan adalah perhitungan timbunan sampah dan perhitungan komposisi sampah. Pada tahap ini *sampling* sampah dilakukan selama 3 hari dan dilaksanakan pada hari jumat, sabtu, dan senin. Jumat dan sabtu mewakili dari hari senin hingga kamis sementara hari senin mewakili hari sabtu hingga minggu. *Sampling* dilakukan di zona *unloading* di TPA Benowo. Sampah yang diambil adalah sampah yang baru datang dan di *unloading* oleh truk sampah. Sampah diambil sebanyak 100 kg dari zona tersebut kemudian dimasukkan ke dalam kotak kayu berukuran 1 m x 0,5 m x 1 m. Sampah tersebut kemudian dipilah sesuai dengan 11 pembagian sampah menurut IPCC *Guideline* 2006 yaitu :

1. Sampah dapur
2. Sampah kebun
3. Kayu
4. Kertas
5. Tekstil
6. Popok dan pembalut
7. Karet dan kulit
8. Plastik

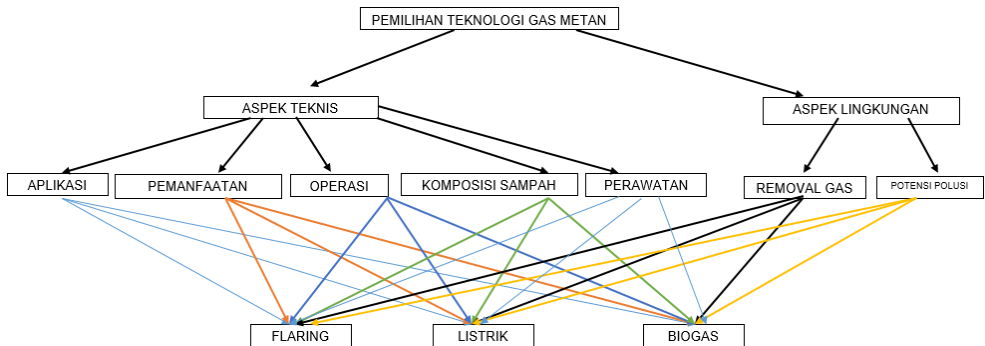
9. Logam
10. Kaca
11. Lain lain

Tahapan selanjutnya yaitu menggunakan metode IPCC *Guideline 2006* berdasarkan buku Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca Nasional Buku II volume 4 terkait metodologi perhitungan tingkat emisi gas dalam bentuk *excel*. Metode kali ini menggunakan tingkat ketelitian Tier 2 dikarenakan telah memiliki data aktivitas berupa komposisi sampah. Langkah untuk mengoperasikan *template* IPCC yaitu:

- Tahap I : Input Parameter
Daerah penelitian berada di Asia Tenggara. Perhitungan ini menggunakan pendekatan berdasarkan komposisi sampah. Angka yang dipilih untuk DOC menggunakan data default dari IPCC. *Oxidation Factor* yang dipilih adalah 0,1 dikarenakan TPA Benowo menggunakan tanah sebagai material penutupnya.
- Tahap II : Penentuan *Metane Correction Factor*
- Tahap III : Input Aktivitas Data
- Tahap IV : Data Jumlah Limbah Yang Dideposisi (Timbun) di TPA
- Tahap V : Hasil Hitungan Emisi CH₄ dari Timbunan Sampah di TPA

Setelah didapatkan hasil emisi gas rumah kaca yang diproduksi dari proses penimbunan di TPA Benowo, selanjutnya menggunakan metode AHP untuk menentukan program pengelolaan emisi gas rumah kaca yang baik untuk TPA Benowo. Metode AHP akan membandingkan antara metode *flaring*, konversi menjadi biogas, dan konversi menjadi listrik. Kriteria yang digunakan untuk membandingkan yaitu mempertimbangkan aspek teknis dan aspek lingkungan. Metode AHP akan menggunakan *software Expert Choice 2011*. Responden yang akan mengisi kuisioner ini adalah orang yang ahli dan paham mengenai teknologi pengelolaan emisi gas rumah kaca. Pemilihan teknologi pengelolaan emisi gas metan mempertimbangkan aspek teknis dan lingkungan. Aspek teknis dan lingkungan dipilih agar memiliki keunggulan dari penggunaannya dan baik bagi lingkungan. Aspek

teknis memiliki kriteria yaitu dapat diaplikasikan, tingkat pemanfaatannya, pengoperasiannya yang mudah, perawatannya yang mudah, dan komposisi sampah yang menghasilkan produksi dan komposisi gas metan. Aspek lingkungan memiliki kriteria yaitu tingkat *removal* gas metan dari teknologi yang dipilih dan potensi polusi yang timbul saat teknologi dijalankan. Hierarki dari metode AHP dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Hierarki Metode AHP

Teknologi yang sudah dipilih menggunakan metode AHP akan dibuat menjadi sebuah program pengelolaan emisi gas metan. Pembuatan program mempertimbangkan hasil yang didapatkan dari produksi gas metan berdasarkan metode IPCC *Guidelines 2006* dan pemilihan teknologi menggunakan metode AHP.

3.2.6 Penyajian Data dan Pembahasan

Pada bagian ini akan dibahas mengenai hasil dari perhitungan emisi gas rumah kaca dari proses penimbunan sampah di TPA Benowo. Selanjutnya akan dibahas bagaimana kondisi eksisting yang ada di TPA Benowo terkait pengelolaan emisi rumah kaca untuk mengetahui program yang tepat untuk mengelola emisi rumah kaca berdasarkan aspek teknis dan aspek lingkungan.

3.2.7 Kesimpulan dan Saran

Dari pembahasan yang telah dilakukan, dapat diambil suatu kesimpulan yang menyatakan ringkasan dari hasil penelitian. Kesimpulan yang diperoleh akan menjawab perumusan masalah penelitian. Selain kesimpulan, saran juga dapat diberikan untuk perbaikan penelitian dan pelaksanaan penelitian selanjutnya.

3.2.8 Penyusunan Laporan

Penyusunan laporan pada penelitian ini akan menggunakan format sesuai dengan Pedoman Penyusunan Tugas Akhir RE141581 Jurusan Teknik Lingkungan ITS yang diterbitkan pada tahun 2015.

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Komposisi Sampah dan Timbunan

Pengamatan dilakukan selama 8 hari dengan 3 hari dilakukan *sampling* di TPA Benowo. *Sampling* dilakukan untuk mengetahui komposisi sampah di TPA Benowo. Komposisi sampah di TPA Benowo dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Komposisi Sampah TPA Benowo

No	Komposisi	Hari ke (dalam %)			Rata Rata
		1	2	3	
1	Sampah dapur	53,9	54,2	50,9	53,0
2	Sampah kebun	3,3	8,9	11,3	7,8
3	Sampah kayu	5,98	5,1	4,4	5,2
4	Kertas	5,48	4,5	5,7	5,2
5	Tekstil	4,17	1,4	2,3	2,6
6	Popok dan Pembalut	10,4	6,8	5,8	7,7
7	Karet dan Kulit	3,8	0,3	4,6	2,9
8	Plastik	10,3	13,5	11,4	11,7
9	Logam	0	1,5	0	0,5
10	Kaca	0,25	1,0	0,4	0,6
11	Lain lain	2,43	2,8	3,2	2,8
Total		100	100	100	100

Komposisi sampah terbesar yaitu sampah dapur sebesar 53%, diikuti sampah plastik dengan 11,7%, dan terbesar ketiga yaitu sampah kebun dengan 7,8%. Sampah dapur menjadi yang terbanyak dikarenakan TPA Benowo memang digunakan sebagai *landfill* bagi sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga. Logam dan kaca merupakan dua tipe sampah paling sedikit di TPA Benowo dikarenakan nilainya yang

ekonomis sehingga banyak dicari oleh pemulung bahkan sebelum sampah tersebut sampai di TPA.

Data lain yang mendukung untuk penelitian ini adalah data sampah masuk ke TPA Benowo dalam 8 hari waktu *sampling* dan data eksisting sampah yang sudah tertimbun. Data sampah masuk ke TPA Benowo didapatkan berdasarkan hasil dari perhitungan berat menggunakan jembatan timbang. Data eksisting sampah didapatkan dari Dinas Kebersihan dan Ruang Terbuka Hijau Kota Surabaya. Data terkait sampah masuk ke TPA Benowo dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan data sampah tertimbun di TPA Benowo pada Tabel 4.3

Tabel 4. 2 Sampah Masuk ke TPA Benowo

Hari ke	kg
1	1.590.860
2	1.560.190
3	1.627.580
4	1.664.310
5	1.622.610
6	1.692.750
7	1.638.360
8	1.663.910
Rata rata	1.632.571

Tabel 4. 3 Sampah Masuk TPA Benowo per Tahun

Nomor	Tahun	Ton
1	2013	500.047
2	2014	531.403
3	2015	539.164
4	2016	575.096
5	2017	595.889

Rata rata sampah yang masuk ke TPA Benowo sebesar 1.632.571 kg/hari. Rata rata sampah yang masuk ke TPA Benowo digunakan sebagai acuan data sampah untuk tahun 2017. Perhitungan sampah tahun 2017 sebagai berikut :

$$\text{Sampah Tahun 2017} = \text{Rata rata sampah} \times 365 \text{ hari}$$

$$= 1632571 \frac{\text{kg}}{\text{hari}} \times 365 \text{ hari}$$

$$= 595889000 \frac{\text{kg}}{\text{tahun}}$$

$$= 595889 \frac{\text{ton}}{\text{tahun}}$$

Rata rata pertumbuhan sampah yang masuk ke TPA Benowo dari tahun 2013 hingga tahun 2017 yaitu sebesar 4%. Pertumbuhan sampah diperlukan untuk mengetahui perkiraan sampah yang akan masuk ke TPA Benowo pada tahun 2027 nanti. Perhitungan sampah masuk ke TPA Benowo pada tahun 2018 yaitu:

$$\text{Sampah tahun 2018} = \text{Sampah tahun 2017} \times (1 + \text{rata rata pertumbuhan sampah})^{2018-2017}$$

$$= 622.720 \text{ ton}$$

Tabel 4. 4 Proyeksi Timbulan Sampah

No	Tahun	Jumlah sampah (Gg)
1	2013	500,047
2	2014	531,403
3	2015	539,164
4	2016	575,096
5	2017	595,889
6	2018	622,720
7	2019	650,759
8	2020	680,061
9	2021	710,683
10	2022	742,683

No	Tahun	Jumlah sampah (Gg)
11	2023	776,124
12	2024	811,071
13	2025	847,591
14	2026	885,756
15	2027	925,639
16	2028	967,318

4.2 Perhitungan Emisi Gas Metan IPCC

Hasil perhitungan produksi gas metan menggunakan *software IPCC Guideline 2006*. Perhitungan menggunakan ketelitian *tier 2* dengan data aktivitas berupa komposisi yang diambil langsung dari pengambilan data langsung di TPA Benowo yang dapat dilihat pada Tabel 4.4. Produksi gas metan dihitung menggunakan rumus 4.1.

$$\text{Emisi CH}_4 \text{ pada tahun } T = [\text{CH}_4 \text{ generated} - R] \times (1 - \text{OX}) \dots 4.1$$

Keterangan :

$\sum \text{CH}_4 \text{ generated}$ = CH_4 yang terbentuk pada satu tahun hasil degradasi organik jenis tertentu yang terseimpan dalam sampah (DDOC)

R = Recovery CH_4 di TPA

OX = Faktor Oksidasi

Gas metan yang diemisikan ke udara dipengaruhi oleh *oxidation factor* sehingga produksi gas metan lebih besar daripada gas metan yang diemisikan. Produksi gas metan lebih besar daripada gas metan yang diemisikan dikarenakan terjadinya oksidasi gas metan yang dilakukan oleh mikroorganisme *methanotropic*. Mikroorganisme tersebut berada pada tanah penutup yang digunakan pada *landfill*.

Perhitungan kali ini menggunakan 3 skenario terkait sampah yang masuk dan ditimbun di TPA Benowo. 3 skenario tersebut adalah :

1. Skenario 1 yaitu sampah yang masuk kedalam TPA langsung ditimbun
2. Skenario 2 yaitu sampah yang masuk adalah sampah yang telah mengalami proses reduksi di sumber menggunakan metode komposting. Komposting berguna untuk mengurangi timbunan sampah dapur yang masuk ke TPA.
3. Skenario 3 yaitu sampah yang masuk ke adalah sampah yang mengalami proses reduksi di sumber berupa composting untuk sampah organik dan sampah plastik, kaca, dan kertas akan di daur ulang.

4.2.1 Perhitungan Emisi Gas Metan Skenario 1

Perhitungan emisi gas metan menggunakan skenario 1 adalah sampah yang masuk ke TPA Benowo langsung ditimbun tanpa mempertimbangkan adanya proses composting atau daur ulang di sumber. Contoh perhitungan emisi gas metan untuk sampah makanan pada tahun 2013 yaitu :

$$\begin{aligned}
 \text{DDOCm terdeposit} &= \text{Berat sampah} \times \text{DOC} \times \text{DOCf} \times \text{MCF} \\
 &= 261,675 \text{ Gigagram} \times 0,15 \times 0,5 \times 0,5 \\
 &= 9,813 \text{ Gigagram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{DDOCm terdekomposisi} &= \text{DDOCm terdeposit} \times (1 - e^{-k}) \\
 &= 9,813 \text{ Gigagram} \times 0,71 \\
 &= 2,877 \text{ Gigagram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CH}_4 \text{ akumulasi} &= \text{DDOCm dekomposisi} \times \frac{16}{12} \times \text{fraksi metan} \\
 &= 2,877 \text{ Gigagram} \times 1,33 \times 0,5 \\
 &= 1,918 \text{ Gigagram}
 \end{aligned}$$

Gas metan yang telah dihasilkan oleh masing masing komposisi sampah kemudian dijumlahkan. Jumlah gas metan dari komposisi sampah tersebut dihitung kembali dikarenakan adanya

faktor koreksi metan. Faktor koreksi metan yang digunakan adalah 0,1. Perhitungan emisi gas metan untuk tahun 2013 yaitu:

$$\begin{aligned}\text{Emisi gas metan} &= [CH_4 \text{ generated} - R] \times (1 - OX) \\ &= [(1,918+0,358+0,116+0,064+0+0)-0] \times (1-0,1) \\ &= 2,210 \text{ Gigagram}\end{aligned}$$

Hasil perhitungan emisi gas metan skenario 1 dapat dilihat pada tabel 4. 5

Tabel 4. 5 Emisi Gas Metan Skenario 1

No	Tahun	Methane Emission
1	2013	2,210
2	2014	4,531
3	2015	5,996
4	2016	7,309
5	2017	8,421
6	2018	9,425
7	2019	10,356
8	2020	11,238
9	2021	12,091
10	2022	12,930
11	2023	13,767
12	2024	14,608
13	2025	15,462
14	2026	16,333
15	2027	17,226
16	2028	18,144

Emisi gas metan mengalami peningkatan seiring meningkatnya timbulan sampah yang masuk ke TPA. Pada tahun

2013 emisi gas metan sebesar 2,210 Gigagram atau setara dengan 2210 ton dan pada tahun 2028 emisi gas metan sebesar 18,144 Gigagram atau setara dengan 18144 ton Gigagram. Perhitungan berdasarkan komposisi sampah dapat dilihat pada Tabel 4.6

Tabel 4. 6 Emisi Gas Metan berdasarkan Komposisi Sampah

No	Tahun	Methane Generated						
		Food	Garden	Paper	Wood	Textile	Nappies	Total
1	2013	1,918	0,358	0,116	0,064	0,000	0,000	2,456
2	2014	3,393	0,682	0,232	0,634	0,035	0,059	5,034
3	2015	4,466	0,961	0,341	0,706	0,070	0,118	6,662
4	2016	5,362	1,222	0,452	0,807	0,103	0,176	8,121
5	2017	6,075	1,456	0,560	0,894	0,137	0,235	9,357
6	2018	6,682	1,673	0,667	0,987	0,169	0,294	10,473
7	2019	7,218	1,876	0,774	1,084	0,202	0,352	11,506
8	2020	7,710	2,069	0,880	1,182	0,234	0,412	12,486
9	2021	8,175	2,252	0,986	1,284	0,266	0,471	13,434
10	2022	8,626	2,430	1,093	1,388	0,298	0,532	14,367
11	2023	9,073	2,604	1,200	1,495	0,330	0,593	15,296
12	2024	9,523	2,776	1,308	1,606	0,363	0,655	16,231
13	2025	9,981	2,947	1,418	1,720	0,395	0,719	17,180
14	2026	10,452	3,118	1,529	1,838	0,429	0,783	18,148
15	2027	10,937	3,291	1,641	1,960	0,462	0,849	19,140
16	2028	11,440	3,467	1,756	2,085	0,496	0,916	20,160

Sampah makanan menghasilkan emisi gas metan terbesar yaitu 11,440 Gigagram CH_4 atau setara dengan 11440 ton CH_4 . Sampah kebun menjadi terbesar kedua dengan 3,467 Gigagram CH_4 dan terbesar ketiga adalah sampah kayu dengan 2,085 Gigagram CH_4 . Sampah tekstil dan popok meskipun memiliki komposisi lebih besar daripada sampah kayu, namun memiliki emisi gas yang lebih kecil dikarenakan tekstil dan popok memiliki ikatan karbon yang lebih sedikit daripada kayu.

4.2.2. Perhitungan Emisi Gas Metan Skenario 2

Skenario 2 pada perhitungan ini adalah mempertimbangkan adanya proses reduksi sampah makanan dan kebun di sumber. Kota Surabaya memiliki 18 rumah kompos yang tersebar sebanyak 1 di Surabaya Pusat, 8 di Surabaya Timur, 6 di Surabaya Selatan, dan 3 di Surabaya Barat yang mereduksi sampah sampah kebun (DKP Surabaya, 2012). Pada skenario 2 dengan reduksi 1, sampah yang masuk ke TPA dikurangi dengan reduksi di sumber berdasarkan penelitian yang telah dilakukan di Surabaya. Agustia (2015) melakukan penelitian terkait emisi gas rumah kaca pada pengelolaan dan pengangkutan sampah di kecamatan Gubeng. Indawati (2012) meneliti tentang kinerja rumah kompos di Kota Surabaya dalam mengurangi sampah Kota Surabaya. Persen reduksi kedua diambil berdasarkan buku oleh Tchobanoglous dkk. (1993). Penelitian tersebut menghitung besarnya reduksi yang ada di sumber hingga TPS. Persentase reduksi dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Reduksi Sampah di Sumber

Sampah	%Reduksi ¹	%Reduksi ²
plastik	5,71	50
makanan	1,30	80
kebun	21,48	80
kertas	10,55	50
logam	15,41	75
kaca	25,56	65
kain	0,00	0
karet	6,97	10
kayu	0.00	0
diapers	0.00	0
b3	0.00	0
lain lain	0.00	0

1 Agustia (2015) dan Indawati (2012)

2 Tchobanoglous dkk. (1993)

Sampah makanan dan sampah kebun direduksi menggunakan komposter dan fasilitas rumah kompos yang berada di Kecamatan Gubeng. Sampah makanan memiliki persen reduksi sebesar 1,3% dan sampah kebun memiliki reduksi sebesar 21,48%. Sampah lain seperti sampah kain, kayu, diapers, b3, dan lain lain dibuang langsung ke TPS tanpa adanya reduksi. Reduksi sampah di sumber membuat sampah yang masuk ke TPA berkurang. Contoh perhitungan sampah yang direduksi untuk sampah makanan pada tahun 2013 yaitu :

Sampah direduksi=Sampah makanan-(Sampah makanan* %reduksi)

Sampah direduksi=261675 ton-(261675ton*(1-0,013)

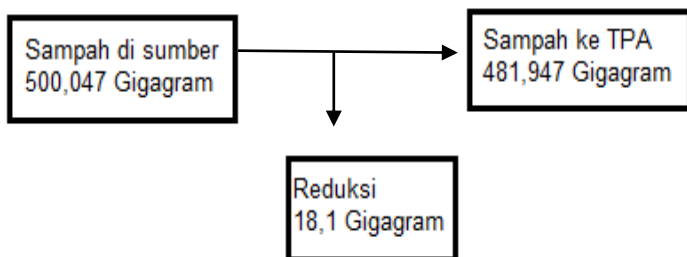
= 3400 ton

Residu = Sampah Makanan – Sampah direduksi

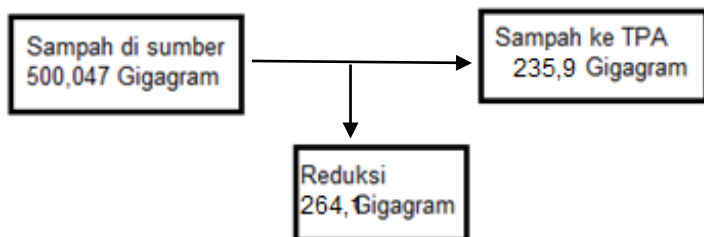
= 261675 ton – 3400 ton

= 258700 ton

Perhitungan juga dilakukan untuk sampah kebun. Setelah melakukan perhitungan terkait adanya reduksi sampah di sumber, maka dapat dibuat kesetimbangan massa terkait skenario 2. Kesetimbangan massa ini terdapat sampah yang berasal dari sumber, sampah yang tereduksi dan sampah yang dikirim ke TPA. Sampah yang direduksi dikurangi menggunakan fasilitas rumah kompos yang ada di Kota Surabaya sebanyak 18 rumah kompos dan direduksi menggunakan proses komposting di sumber oleh warga setempat. Skenario 2 reduksi 1 dapat mengurangi sampah di sumber sebesar 18,1 Gigagram atau setara dengan 18.100 ton sampah dan sampah yang masuk ke TPA sebesar 481,947 Gigagram atau sebesar 481.947 ton. Skenario 2 reduksi 2 mengurangi sampah sebesar 264,1 Gigagram atau setara dengan 264.100 ton sampah dan sampah yang masuk ke TPA sebesar 235,9 Gigagram atau setara dengan 235.900 ton sampah. Kesetimbangan massa skenario 2 pada tahun 2013 dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan 4.2 serta proyeksi pada Tabel 4.8 dan 4.9.



Gambar 4. 1 Keseimbangan Massa Skenario 2 Reduksi 1



Gambar 4. 2 Keseimbangan Massa Skenario 2 Reduksi 2

Sampah makanan direduksi dengan komposting di sumber sedangkan sampah kebun direduksi dengan komposting menggunakan rumah kompos. Skenario 2 dengan persen reduksi 1 mampu mengurangi sampah sebesar 18,1 Gigagram atau setara dengan 18.100 ton sampah. Skenario 2 dengan persen reduksi 2 mampu mengurangi sampah sebesar 264, 1 Gigagram atau setara dengan 264.100 Gigagram.

Tabel 4. 8 Sampah Skenario 2 Reduksi 1

No	Tahun	Jumlah sampah (Gg)	Sampah makanan	Reduksi	Residu	Sampah Kebun	Reduksi	Residu	Kertas	Kayu	Tekstil	Popok	Plastik dan inert
			52,33%			13,68%			5,22%	5,12%	2,63%	6%	15,02%
1	2013	500,047	261,675	3,4	258,27	68,406	14,7	53,71	26,102	25,602	13,151	30,003	75,107
2	2014	531,403	278,083	3,6	274,47	72,696	15,6	57,08	27,739	27,208	13,976	31,884	79,817
3	2015	539,164	282,145	3,7	278,48	73,758	15,8	57,91	28,144	27,605	14,180	32,350	80,982
4	2016	575,096	300,948	3,9	297,04	78,673	16,9	61,77	30,020	29,445	15,125	34,506	86,379
5	2017	595,889	311,828	4,1	307,78	81,518	17,5	64,01	31,105	30,509	15,672	35,753	89,502
6	2018	622,720	325,869	4,2	321,63	85,188	18,3	66,89	32,506	31,883	16,378	37,363	93,533
7	2019	650,759	340,542	4,4	336,12	89,024	19,1	69,90	33,970	33,319	17,115	39,046	97,744
8	2020	680,061	355,876	4,6	351,25	93,032	20,0	73,05	35,499	34,819	17,886	40,804	102,145
9	2021	710,683	371,900	4,8	367,07	97,221	20,9	76,34	37,098	36,387	18,691	42,641	106,745
10	2022	742,683	388,646	5,1	383,60	101,599	21,8	79,77	38,768	38,025	19,533	44,561	111,551
11	2023	776,124	406,146	5,3	400,87	106,174	22,8	83,36	40,514	39,738	20,412	46,567	116,574
12	2024	811,071	424,433	5,5	418,92	110,954	23,8	87,12	42,338	41,527	21,331	48,664	121,823
13	2025	847,591	443,544	5,8	437,78	115,950	24,9	91,04	44,244	43,397	22,292	50,855	127,308
14	2026	885,756	463,516	6,0	457,49	121,171	26,0	95,14	46,236	45,351	23,295	53,145	133,041
15	2027	925,639	484,3870446	6,3	478,09	126,627	27,2	99,42	48,318	47,393	24,344	55,538	139,03102
16	2028	967,318	506,198	6,6	499,62	132,329	28,4	103,90	50,494	49,527	25,440	58,039	145,291

Tabel 4. 9 Sampah Skenario 2 Reduksi 2

No	Tahun	Jumlah sampah (Gg)	Sampah makanan	Reduksi	Residu	Sampah Kebun	Reduksi	Residu	Kertas	Kayu	Tekstil	Popok	Plastik dan inert
			52,33%			13,68%			5,22%	5,12%	2,63%	6%	15,02%
1	2013	500,047	261,675	209,3	52,33	68,406	54,7	13,68	26,102	25,602	13,151	30,003	75,107
2	2014	531,403	278,083	222,5	55,62	72,696	58,2	14,54	27,739	27,208	13,976	31,884	79,817
3	2015	539,164	282,145	225,7	56,43	73,758	59,0	14,75	28,144	27,605	14,180	32,350	80,982
4	2016	575,096	300,948	240,8	60,19	78,673	62,9	15,73	30,020	29,445	15,125	34,506	86,379
5	2017	595,889	311,828	249,5	62,37	81,518	65,2	16,30	31,105	30,509	15,672	35,753	89,502
6	2018	622,720	325,869	260,7	65,17	85,188	68,2	17,04	32,506	31,883	16,378	37,363	93,533
7	2019	650,759	340,542	272,4	68,11	89,024	71,2	17,80	33,970	33,319	17,115	39,046	97,744
8	2020	680,061	355,876	284,7	71,18	93,032	74,4	18,61	35,499	34,819	17,886	40,804	102,145
9	2021	710,683	371,900	297,5	74,38	97,221	77,8	19,44	37,098	36,387	18,691	42,641	106,745
10	2022	742,683	388,646	310,9	77,73	101,599	81,3	20,32	38,768	38,025	19,533	44,561	111,551
11	2023	776,124	406,146	324,9	81,23	106,174	84,9	21,23	40,514	39,738	20,412	46,567	116,574
12	2024	811,071	424,433	339,5	84,89	110,954	88,8	22,19	42,338	41,527	21,331	48,664	121,823
13	2025	847,591	443,544	354,8	88,71	115,950	92,8	23,19	44,244	43,397	22,292	50,855	127,308
14	2026	885,756	463,516	370,8	92,70	121,171	96,9	24,23	46,236	45,351	23,295	53,145	133,041
15	2027	925,639	484,387	387,5	96,88	126,627	101,3	25,33	48,318	47,393	24,344	55,538	139,03102
16	2028	967,318	506,198	405,0	101,24	132,329	105,9	26,47	50,494	49,527	25,440	58,039	145,291

Perhitungan emisi gas metan pada skenario 2 menggunakan komposisi dan berat sampah yang ada pada Tabel 4.8 dan 4.9. Pada skenario 2 terdapat pengurangan jumlah sampah yang diakibatkan adanya reduksi sampah dapur/makanan dan sampah kebun. Contoh perhitungan emisi gas metan untuk skenario 2 reduksi 1 dan reduksi 2 untuk sampah makanan yaitu:

- Reduksi 1

$$\begin{aligned}\text{DDOCm terdeposit} &= \text{Berat sampah} \times \text{DOC} \times \text{DOCf} \times \text{MCF} \\ &= 258,27 \text{ Gigagram} \times 0,15 \times 0,5 \times 0,5 \\ &= 9,685 \text{ Gigagram}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{DDOCm terdekomposisi} &= \text{DDOCm terdeposit} \times (1 - e^{-k}) \\ &= 9,685 \text{ Gigagram} \times 0,71 \\ &= 2,840 \text{ Gigagram}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{CH}_4 \text{ akumulasi} &= \text{DDOCm dekomposisi} \times \frac{16}{12} \times \text{fraksi metan} \\ &= 2,840 \text{ Gigagram} \times 1,33 \times 0,5 \\ &= 1,893 \text{ Gigagram}\end{aligned}$$

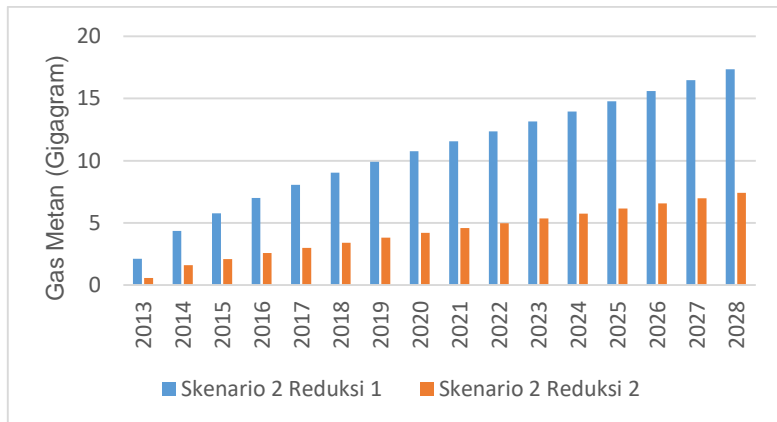
- Reduksi 2

$$\begin{aligned}\text{DDOCm terdeposit} &= \text{Berat sampah} \times \text{DOC} \times \text{DOCf} \times \text{MCF} \\ &= 52,33 \text{ Gigagram} \times 0,15 \times 0,5 \times 0,5 \\ &= 1,963 \text{ Gigagram}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{DDOCm terdekomposisi} &= \text{DDOCm terdeposit} \times (1 - e^{-k}) \\
 &= 1,963 \text{ Gigagram} \times 0,71 \\
 &= 0,575 \text{ Gigagram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CH}_4 \text{ akumulasi} &= \text{DDOCm dekomposisi} \times \frac{16}{12} \times \text{fraksi metan} \\
 &= 0,575 \text{ Gigagram} \times 1,33 \times 0,5 \\
 &= 0,384 \text{ Gigagram}
 \end{aligned}$$

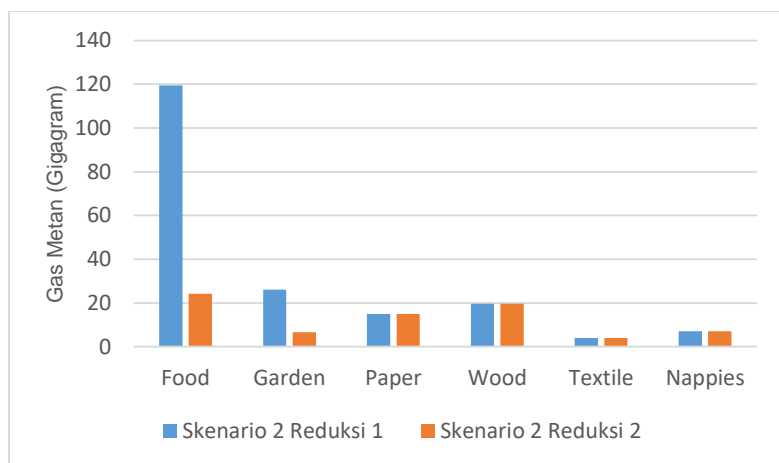
Gas metan yang telah dihasilkan oleh tiap komposisi sampah kemudian dijumlahkan. Jumlah gas metan dari komposisi sampah tersebut dihitung kembali dikarenakan adanya faktor koreksi metan sebesar 0,1. Emisi gas metan skenario 2 dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Emisi Gas Metan Skenario 2

Berdasarkan hasil yang didapatkan pada Grafik 4.3 dapat dilihat bahwa emisi gas metan mengalami peningkatan dari tahun

ke tahun. Peningkatan terjadi dikarenakan adanya peningkatan laju timbunan sampah. Pada skenario 2, reduksi tidak mengalami peningkatan sehingga dari 2013 hingga 2028 memiliki persentase reduksi yang sama. Emisi gas metan untuk reduksi 1 pada tahun 2017 yaitu sebesar 8,068 Gigagram atau 8068 ton. Berdasarkan hasil dari proyeksi, maka proyeksi emisi gas metan pada tahun 2028 yaitu sebesar 17,340 Gigagram atau 17340 ton. Emisi gas metan untuk reduksi 2 pada tahun 2017 sebesar 0,572 Gigagram dan pada tahun 2028 sebesar 7,412 Gigagram. Emisi gas metan berdasarkan komposisi sampah dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Emisi Gas Metan Skenario 2

Berdasarkan Gambar 4.4 emisi gas metan paling besar berasal dari dari sampah makanan, diikuti dengan sampah kebun lalu sampah kayu. Pada tahun 2017 emisi gas metan dari sampah makanan yaitu sebesar 11,291 Gigagram dan 2,998 Gigagram. Sampah makanan menjadi yang terbesar dikarenakan memiliki komposisi sampah terbesar daripada yang lainnya.

4.2.3. Perhitungan Emisi Gas Metan Skenario 3

Perhitungan emisi gas metan menggunakan skenario 3 menggunakan pertimbangan adanya reduksi menggunakan

komposting dan daur ulang dari sampah. Sampah yang dikomposting adalah sampah makanan dan sampah kebun. Sampah yang didaur ulang adalah sampah kertas. Sampah kertas diharapkan telah dipilah disumber sehingga mengurangi persentasenya yang masuk ke dalam TPA. Skenario dengan reduksi 1 adalah menggunakan persen reduksi eksisting sedangkan skenario dengan reduksi 2 adalah menggunakan persen reduksi potensi yang berasal dari literature. Persen reduksi yang digunakan adalah sesuai dengan Tabel 4.7 terkait persen reduksi sampah..

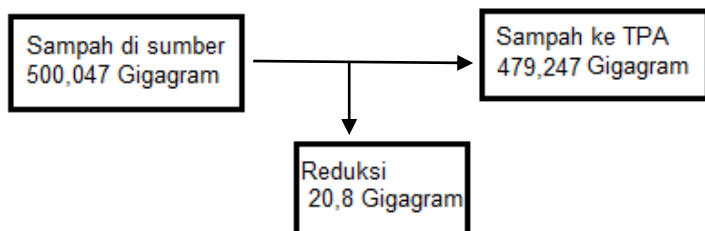
Sampah makanan memiliki persen reduksi sebesar 1,3%, sampah kebun memiliki reduksi sebesar 21,48%, dan sampah kertas memiliki reduksi sebesar 10,55% untuk skenario dengan persen reduksi 1. Skenario dengan reduksi 2 untuk sampah makanan sebesar 80%, sampah kebun 80%, sampah kertas 50%. Sampah lain seperti sampah kain, kayu, diapers, b3, dan lain lain dibuang langsung ke TPS tanpa adanya reduksi. Reduksi sampah di sumber membuat sampah yang masuk ke TPA berkurang. Perhitungan sampah kertas yang direduksi yaitu :

$$\text{Sampah direduksi} = \text{Sampah kertas} - (\text{Sampah kertas} * \% \text{reduksi})$$

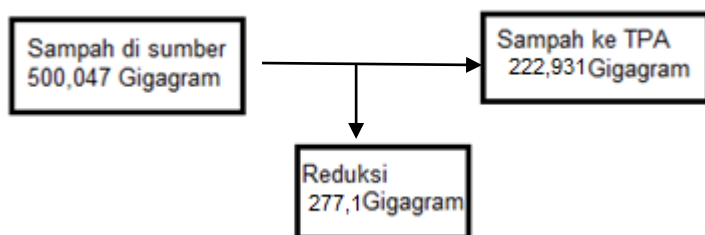
$$\begin{aligned} \text{Sampah direduksi} &= 26102 \text{ ton} - (26102 \text{ ton} * (1 - 0,10)) \\ &= 2800 \text{ ton} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Residu} &= \text{Sampah kertas} - \text{Sampah direduksi} \\ &= 26102 \text{ ton} - 2800 \text{ ton} \\ &= 23302 \text{ ton} \end{aligned}$$

Sampah makanan, sampah kebun, dan sampah kertas yang direduksi kemudian diproyeksikan dan dihitung jumlahnya. Kesetimbangan massa untuk skenario 3 dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan 4.6 serta besarnya sampah skenario 2 dapat dilihat pada Tabel 4.13 dan 4.14



Gambar 4. 5 Keseimbangan Massa Skenario 3 Reduksi 1



Gambar 4. 6 Keseimbangan Massa Skenario 3 Reduksi 2

Skenario 3 dengan persen reduksi 1 mampu mengurangi sampah sebesar 20,8 Gigagram. Skenario 3 dengan reduksi 2 mampu mereduksi sampah hingga 277,1 Gigagram. Skenario 3 dengan reduksi 2 lebih besar mereduksi sampah dikarenakan persen reduksi yang digunakan merupakan persen reduksi potensi dari suatu sampah. Sampah yang direduksi pada skenario 3 akan diolah menggunakan metode komposting untuk sampah makanan dan sampah kebun sedangkan metode pemilahan mengurangi sampah kertas. Sampah residu akan langsung dibuang ke TPA Benowo.

Tabel 4. 10 Sampah Skenario 3 Reduksi 1

No	Tahun	Jumlah sampah (Gg)	Sampah makanan	Reduksi	Residu	Sampah Kebun	Reduksi	Residu	Kertas	Reduksi	Residu	Kayu	Tekstil	Popok	Plastik dan inert
			52,33%			13,68%			5,22%			5,12%	2,63%	6%	15,02%
1	2013	500,047	261,675	3,4	258,27	68,406	14,7	53,71	26,102	2,8	23,35	25,602	13,151	30,003	75,107
2	2014	531,403	278,083	3,6	274,47	72,696	15,6	57,08	27,739	2,9	24,81	27,208	13,976	31,884	79,817
3	2015	539,164	282,145	3,7	278,48	73,758	15,8	57,91	28,144	3,0	25,18	27,605	14,180	32,350	80,982
4	2016	575,096	300,948	3,9	297,04	78,673	16,9	61,77	30,020	3,2	26,85	29,445	15,125	34,506	86,379
5	2017	595,889	311,828	4,1	307,78	81,518	17,5	64,01	31,105	3,3	27,82	30,509	15,672	35,753	89,502
6	2018	622,720	325,869	4,2	321,63	85,188	18,3	66,89	32,506	3,4	29,08	31,883	16,378	37,363	93,533
7	2019	650,759	340,542	4,4	336,12	89,024	19,1	69,90	33,970	3,6	30,39	33,319	17,115	39,046	97,744
8	2020	680,061	355,876	4,6	351,25	93,032	20,0	73,05	35,499	3,7	31,75	34,819	17,886	40,804	102,145
9	2021	710,683	371,900	4,8	367,07	97,221	20,9	76,34	37,098	3,9	33,18	36,387	18,691	42,641	106,745
10	2022	742,683	388,646	5,1	383,60	101,599	21,8	79,77	38,768	4,1	34,68	38,025	19,533	44,561	111,551
11	2023	776,124	406,146	5,3	400,87	106,174	22,8	83,36	40,514	4,3	36,24	39,738	20,412	46,567	116,574
12	2024	811,071	424,433	5,5	418,92	110,954	23,8	87,12	42,338	4,5	37,87	41,527	21,331	48,664	121,823
13	2025	847,591	443,544	5,8	437,78	115,950	24,9	91,04	44,244	4,7	39,58	43,397	22,292	50,855	127,308
14	2026	885,756	463,516	6,0	457,49	121,171	26,0	95,14	46,236	4,9	41,36	45,351	23,295	53,145	133,041
15	2027	925,639	484,387	6,3	478,09	126,627	27,2	99,42	48,318	5,1	43,22	47,393	24,344	55,538	139,031
16	2028	967,318	506,198	6,6	499,62	132,329	28,4	103,90	50,494	5,3	45,17	49,527	25,440	58,039	145,291

Tabel 4. 11 Sampah Skenario 3 Reduksi 2

No	Tahun	Jumlah sampah (Gg)	Sampah makanan 52,33%	Reduksi	Residu	Sampah Kebun 13,68%	Reduksi	Residu	Kertas 5,22%	Reduksi	Residu	Kayu 5,12%	Tekstil 2,63%	Popok 6%	Plastik dan inert 15,02%
1	2013	500,047	261,675	209,3	52,33	68,406	54,7	13,68	26,102	13,1	13,05	25,602	13,151	30,003	75,107
2	2014	531,403	278,083	222,5	55,62	72,696	58,2	14,54	27,739	13,9	13,87	27,208	13,976	31,884	79,817
3	2015	539,164	282,145	225,7	56,43	73,758	59,0	14,75	28,144	14,1	14,07	27,605	14,180	32,350	80,982
4	2016	575,096	300,948	240,8	60,19	78,673	62,9	15,73	30,020	15,0	15,01	29,445	15,125	34,506	86,379
5	2017	595,889	311,828	249,5	62,37	81,518	65,2	16,30	31,105	15,6	15,55	30,509	15,672	35,753	89,502
6	2018	622,720	325,869	260,7	65,17	85,188	68,2	17,04	32,506	16,3	16,25	31,883	16,378	37,363	93,533
7	2019	650,759	340,542	272,4	68,11	89,024	71,2	17,80	33,970	17,0	16,98	33,319	17,115	39,046	97,744
8	2020	680,061	355,876	284,7	71,18	93,032	74,4	18,61	35,499	17,7	17,75	34,819	17,886	40,804	102,145
9	2021	710,683	371,900	297,5	74,38	97,221	77,8	19,44	37,098	18,5	18,55	36,387	18,691	42,641	106,745
10	2022	742,683	388,646	310,9	77,73	101,599	81,3	20,32	38,768	19,4	19,38	38,025	19,533	44,561	111,551
11	2023	776,124	406,146	324,9	81,23	106,174	84,9	21,23	40,514	20,3	20,26	39,738	20,412	46,567	116,574
12	2024	811,071	424,433	339,5	84,89	110,954	88,8	22,19	42,338	21,2	21,17	41,527	21,331	48,664	121,823
13	2025	847,591	443,544	354,8	88,71	115,950	92,8	23,19	44,244	22,1	22,12	43,397	22,292	50,855	127,308
14	2026	885,756	463,516	370,8	92,70	121,171	96,9	24,23	46,236	23,1	23,12	45,351	23,295	53,145	133,041
15	2027	925,639	484,387	387,5	96,88	126,627	101,3	25,33	48,318	24,2	24,16	47,393	24,344	55,538	139,031
16	2028	967,318	506,198	405,0	101,24	132,329	105,9	26,47	50,494	25,2	25,25	49,527	25,440	58,039	145,291

Pada skenario 3 terdapat pengurangan jumlah sampah yang diakibatkannya adanya reduksi sampah dapur/makanan, sampah kebun, dan sampah kertas berdasarkan persen reduksi 1 dan persen reduksi 2. Contoh perhitungan emisi gas metan untuk skenario 2 reduksi 1 dan reduksi 2 untuk sampah makanan yaitu:

- Reduksi 1

$$\begin{aligned}\text{DDOCm terdeposit} &= \text{Berat sampah} \times \text{DOC} \times \text{DOCf} \times \text{MCF} \\ &= 258,27 \text{ Gigagram} \times 0,15 \times 0,5 \times 0,5 \\ &= 9,685 \text{ Gigagram}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{DDOCm terdekomposisi} &= \text{DDOCm terdeposit} \times (1 - e^{-k}) \\ &= 9,685 \text{ Gigagram} \times 0,71 \\ &= 2,840 \text{ Gigagram}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{CH}_4 \text{ akumulasi} &= \text{DDOCm dekomposisi} \times \frac{16}{12} \times \text{fraksi metan} \\ &= 2,840 \text{ Gigagram} \times 1,33 \times 0,5 \\ &= 1,893 \text{ Gigagram}\end{aligned}$$

- Reduksi 2

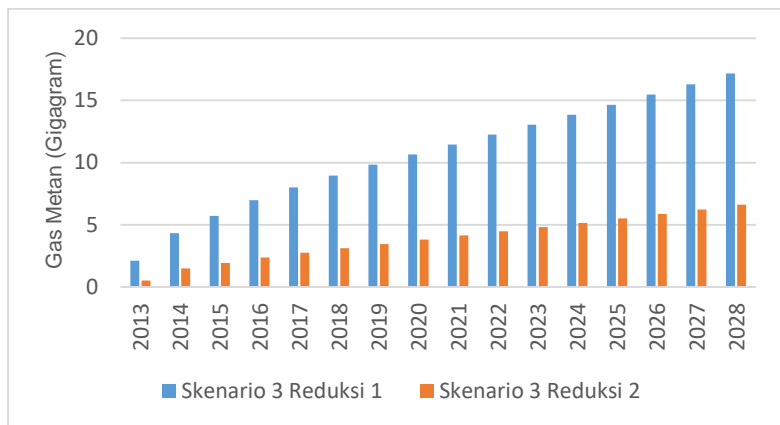
$$\begin{aligned}\text{DDOCm terdeposit} &= \text{Berat sampah} \times \text{DOC} \times \text{DOCf} \times \text{MCF} \\ &= 52,33 \text{ Gigagram} \times 0,15 \times 0,5 \times 0,5 \\ &= 1,963 \text{ Gigagram}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{DDOCm terdekomposisi} &= \text{DDOCm terdeposit} \times (1 - e^{-k}) \\ &= 1,963 \text{ Gigagram} \times 0,71 \\ &= 0,575 \text{ Gigagram}\end{aligned}$$

$$\text{CH}_4 \text{ akumulasi} = \text{DDOCm dekomposisi} \times \frac{16}{12} \times \text{fraksi metan}$$

$$= 0,575 \text{ Gigagram} \times 1,33 \times 0,5 = 0,384 \text{ Gigagram}$$

Gas metan yang telah dihasilkan oleh tiap komposisi sampah kemudian dijumlahkan. Jumlah gas metan dari komposisi sampah tersebut dihitung kembali dikarenakan adanya faktor koreksi metan sebesar 0,1. Emisi gas metan skenario 3 dapat dilihat pada Gambar 4.7.

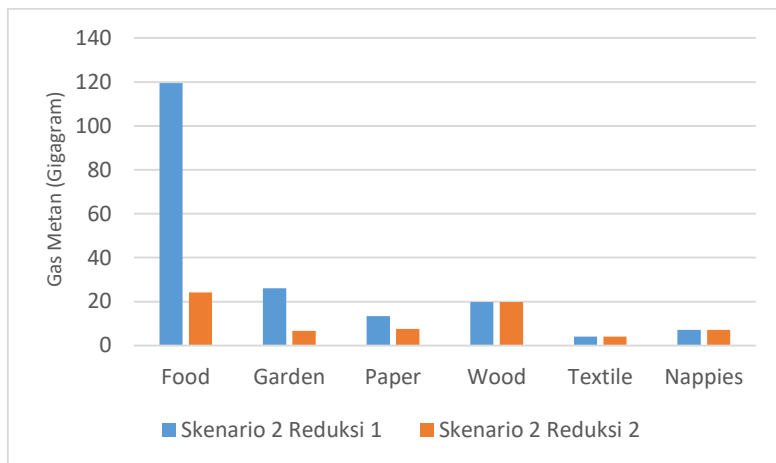


Gambar 4. 7 Emisi Gas Metan Skenario 3

Berdasarkan hasil yang didapatkan pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa emisi gas metan mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Peningkatan terjadi dikarenakan adanya peningkatan laju timbunan sampah pula. Pada skenario 3, reduksi tidak mengalami peningkatan sehingga dari 2013 hingga 2028 memiliki persentase reduksi yang sama.

Emisi gas metan reduksi 1 pada tahun 2017 yaitu sebesar 8,015 Gigagram atau 8015 ton. Berdasarkan hasil dari proyeksi, maka proyeksi emisi gas metan pada tahun 2028 yaitu sebesar 17,174 Gigagram atau 17174 ton. Emisi gas metan reduksi 2 pada

tahun 2017 yaitu sebesar 2,706 Gigagram atau 2706 ton. Berdasarkan hasil dari proyeksi, maka proyeksi emisi gas metan pada tahun 2028 yaitu sebesar 6,621 Gigagram atau 6621 ton. Emisi gas metan berdasarkan komposisi sampah dapat dilihat pada Gambar 4.8.



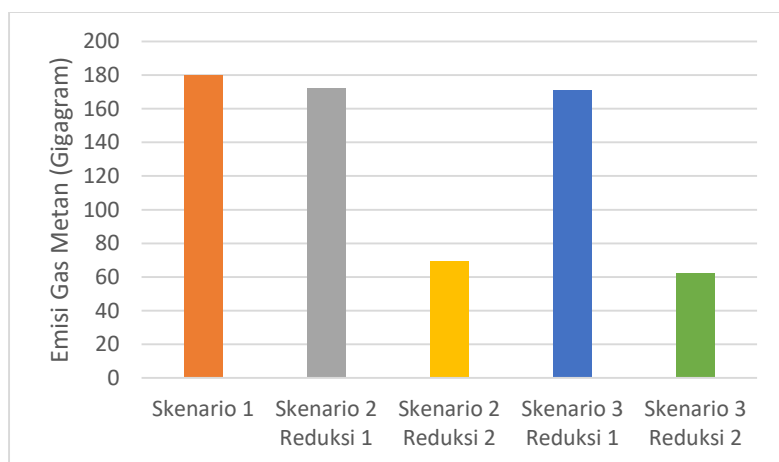
Gambar 4. 8 Emisi Gas Metan Berdasarkan Komposisi

Berdasarkan Gambar 4.4 emisi gas metan paling besar berasal dari dari sampah makanan atau dapur, diikuti dengan sampah kebun lalu sampah kayu. Pada tahun 2028 emisi gas metan dari sampah makanan yaitu sebesar 11,291 Gigagram dan 2,288, sampah kebun sebesar 2,722 Gigagram dan 0,693 Gigagram, dan sampah kayu sebesar 2,085 Gigagram. Sampah makanan menjadi yang terbesar dikarenakan memiliki komposisi sampah terbesar daripada yang lainnya.

4.2.4 Perbandingan Emisi Gas Metan Skenario

Emisi gas metan yang telah dihitung dibandingkan satu dengan lainnya. Skenario 1 yaitu sampah yang masuk kedalam TPA langsung ditimbun. Skenario 2 yaitu sampah yang masuk adalah sampah yang telah mengalami proses reduksi di sumber menggunakan metode komposting. Skenario 2 tidak

mempertimbangkan emisi gas metan yang timbul akibat adanya proses komposting. Komposting berguna untuk mengurangi timbunan sampah dapur yang masuk ke TPA. Skenario 3 yaitu sampah yang masuk ke adalah sampah yang mengalami proses reduksi di sumber berupa composting untuk sampah organik dan sampah plastik, kaca, dan kertas akan di daur ulang. Pada skenario 2 dan 3 terdapat dua perbedaan persen reduksi. Reduksi 1 merupakan persen reduksi yang didapatkan dari kondisi eksisting pada penelitian Agustia (2015) sedangkan Reduksi 2 merupakan persen reduksi berupa potensi reduksi yang didapatkan dari buku oleh Tchobanoglous dkk. (1993). Perbandingan emisi gas metan berdasarkan skenario dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Perbandingan Emisi Gas Metan

Emisi gas metan paling besar berasal dari skenario 1, lalu skenario 2, lalu yang terakhir adalah skenario 3. Skenario 1 memiliki emisi terbesar dikarenakan tidak adanya proses reduksi sampah sehingga emisi gas metan juga besar. Skenario 2 menggunakan persen reduksi eksisting mampu mengurangi emisi gas metan sebesar 0,804 Gigagram atau sebesar 4,43%. Skenario 2 menggunakan persen reduksi potensi mampu mengurangi emisi

gas metan sebesar 10,732 Gigagram atau sebesar 59%. Skenario 3 menggunakan persen reduksi eksisting mampu mengurangi emisi gas metan sebesar 0,97 Gigagram atau sebesar 5,346%. Skenario 3 menggunakan persen reduksi potensi mampu mengurangi emisi gas metan sebesar 11,523 Gigagram atau sebesar 63,5%.

4.3. Perhitungan Gas Metan *Triangular Method*

Perhitungan gas metan menggunakan *Triangular Method* membutuhkan data hasil dari *proximate analysis* dan *ultimate analysis* dari sampah. Hasil dari *proximate analysis* dan *ultimate analysis* dari sampah menggunakan tipikal dari buku yang ditulis oleh Thcobanoglous dkk. (1993). Perhitungan dilakukan menggunakan sampah tahun 2013. Proses degradasi cepat yaitu sampah makanan, kertas, kebun dan proses degradasi lambat dari sampah plastik, kaca, logam, popok, pembalut, karet, kulit, kayu, kain, dan lainnya. Perhitungan mempertimbangkan adanya persentase dari C, H, O, N, S, abu dan memiliki pengaruh dari *moisture*. Persentase C, H, O, N, S, abu dan kadar air dapat dilihat pada Tabel 4.12 dan 4.13

Tabel 4. 12 Kadar Air Sampah

Komposisi Sampah	Kadar air (%)
Plastik	0,2
Kaca	2,0
Logam	5,0
Popok dan pembalut	10,0
Karet dan kulit	1,2
Kayu	12
Kain	10,0
Makanan	70
Kertas	10
kebun	20
Lainnya	3,2

Sumber : Thcobanoglous dkk. (1993)

Tabel 4. 13 Persentase C, H, O, N, S, dan Abu

Komposisi	C	H	O	N	S	debu
Plastik	60,0%	7,2%	22,8%	0,0%	0,0%	10,0%
Kaca	0,5%	0,1%	0,4%	0,1%	0,0%	98,9%
Logam	4,5%	0,6%	4,3%	0,1%	0,0%	90,5%
Popok	55,0%	6,6%	31,2%	4,6%	0,2%	2,4%
Karet kulit	78,0%	10,0%	0,0%	2,0%	0,0%	10,0%
Kain	55,0%	6,6%	31,2%	4,6%	0,2%	2,4%
Lainnya	26,3%	3,0%	2,0%	0,5%	0,2%	68,0%
Kayu	49,5%	6,0%	42,7%	0,2%	0,1%	1,5%
Makanan	48,0%	6,4%	37,6%	2,6%	0,4%	5,0%
Kertas	43,5%	6,0%	44,0%	0,3%	0,2%	6,0%
Kebun	47,8%	6,0%	38,0%	3,4%	0,3%	4,5%

Sumber : Thcobanoglous dkk. (1993)

Perhitungan dilakukan terpisah antara sampah degradasi cepat dan sampah degradasi lambat. Berdasarkan perhitungan didapatkan rumus dari proses degradasi cepat adalah $C_{23,1}H_{36,3}O_{14,2}N$ dan rumus dari proses degradasi lambat adalah $C_{39,9}H_{57,4}O_{13,1}N$. Perhitungan dilanjutkan dengan mengestimasi besarnya metan dan karbondioksida yang diproduksi dengan rumus 4.2.

$$C_a H_b O_c N_d + \left(\frac{4a - b - 2c + 3d}{4} \right) H_2O \rightarrow \left(\frac{4a + b - 2c - 3d}{8} \right) CH_4 + \left(\frac{4a - b + 2c + 3d}{8} \right) CO_2 + dNH_3$$

.....4.2

Perhitungan dari proses degradasi cepat yaitu:

Rumus kimia = $C_{23,1}H_{36,3}O_{14,2}N$

A = 23,1

$$B = 35,3$$

$$C = 14,2$$

$$D = 1$$

$$C_{23,1}H_{36,3}O_{14,2}N + \left(\frac{4x_{23,1} - 35,3 - 2x_{14,2} + 3x_1}{4} \right) H_2O \\ \rightarrow \left(\frac{4x_{23,1} + 35,3 - 2x_{14,2} - 3x_1}{8} \right) CH_4 \\ + \left(\frac{4x_{23,1} - 35,3 + 2x_{14,2} + 3x_1}{8} \right) CO_2 + 1NH_3$$

Hasil yang didapatkan untuk CH_4 adalah 12,07 dan hasil yang didapatkan untuk CO_2 adalah 11,06. Setelah mengetahui besarnya metan dan karbondioksida yang diproduksi maka dicari massa relative dari sampah, metan, dan karbon dioksida. Massa relative berdasarkan perhitungan diatas yaitu :

- $Mr C_{23,1}H_{36,3}O_{14,2}N = 554,70$
- $Mr CH_4 = 194,67$
- $Mr CO_2 = 481,27$

- $Mr C_{39,9}H_{57,4}O_{13,1}N = 759,80$
- $Mr CH_4 = 376,67$
- $Mr CO_2 = 722,31$

Perhitungan produksi dari metan dan karbondioksida yaitu:

- $CH_4 \text{ cepat} = \frac{Mr \text{ Metan} \times \text{Berat sampah}}{\text{Berat jenis metan} \times Mr \text{ sampah} \times 16,019}$
 $= \frac{194,67 \times 7.505.929.203 \text{ kg}}{0,0488 \times Mr 554,70 \times 16,019}$
 $= 3.670.553.701,6 \text{ m}^3$

- $CH_4 \text{ lambat} = \frac{Mr \text{ Metan} \times \text{Berat sampah}}{\text{Berat jenis metan} \times Mr \text{ sampah} \times 16,019}$
 $= \frac{376,67 \times 3.856.074.787,77 \text{ kg}}{0,0488 \times 759,80 \times 16,019}$

$$= 10.303.607.421,33 \text{ m}^3$$

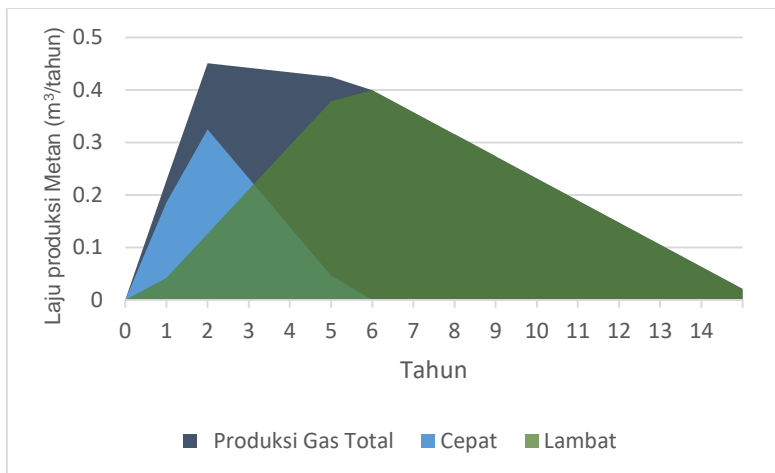
- CO_2 Cepat
$$= \frac{\text{Mr CO}_2 \times \text{Berat sampah}}{\text{Berat jenis CO}_2 \times \text{Mr sampah} \times 16,019}$$
$$= \frac{194,67 \times 7.505.929.203 \text{ kg}}{0,1235 \times \text{Mr } 554,70 \times 16,019}$$
$$= 3.291.783.264,57 \text{ m}^3$$

- CO_2 lambat
$$= \frac{\text{Mr CO}_2 \times \text{Berat sampah}}{\text{Berat jenis CO}_2 \times \text{Mr sampah} \times 16,019}$$
$$= \frac{376,67 \times 3.856.074.787,77 \text{ kg}}{0,1235 \times 759,80 \times 16,019}$$
$$= 1.852.966.287,58 \text{ m}^3$$

- Komposisi Gas
$$= \frac{\text{Total Gas Metan}}{\text{Total Gas Metan} + \text{Total Gas CO}_2} \times 100\%$$
$$= \frac{13.974.161.122,89}{13.974.161.122,89 + 5.1444.749.552} \times 100\%$$
$$= 55,8 \% \text{ Gas metan}$$

Persentase besarnya komposisi gas metan adalah 55,8% dan gas karbondioksida adalah 44,2%. Persentase jumlah gas yang di timbul di *landfill* dipengaruhi oleh komposisi sampah, umur landfill, kuantitas sampah, kadar air, dan rasio ketersediaan hydrogen serta oksigen saat terjadi proses degradasi sampah. Pada kondisi anaerobic, sampah di *landfill* akan membentuk 60% metan dan 40% karbon dioksida (Jha, dkk.,2008). Perhitungan untuk laju produksi gas yaitu:

- Total gas/kg sampah cepat = 0,93 m³/kg sampah
- Total gas/kg sampah lambat= 3,15 m³/kg sampah
- Peak rate sampah cepat = 0,37 m³/tahun
- Peak rate sampah lambat = 0,42 m³/tahun



Gambar 4. 10 Produksi Gas di TPA Benowo

Laju total produksi gas dari sampah dapat dilihat pada Gambar 4.10. Sumbu X menggambarkan tahun terproduksi gas metan dan Sumbu Y menggambarkan besaran laju produksi gas metan dalam satuan m^3/tahun . Proses degradasi sampah cepat berlangsung dalam waktu 5 tahun dan proses degradasi sampah lambat berlangsung dalam kurun waktu 15 tahun. Pada proses degradasi sampah cepat mengalami puncaknya pada tahun kedua dan pada proses degradasi sampah lambat mengalami puncaknya pada tahun ke 6. Gas terproduksi maksimal pada tahun kedua penimbunan dikarenakan adanya produksi dari komposisi sampah terbesar yang terdegradasi secara cepat yaitu sampah makanan.

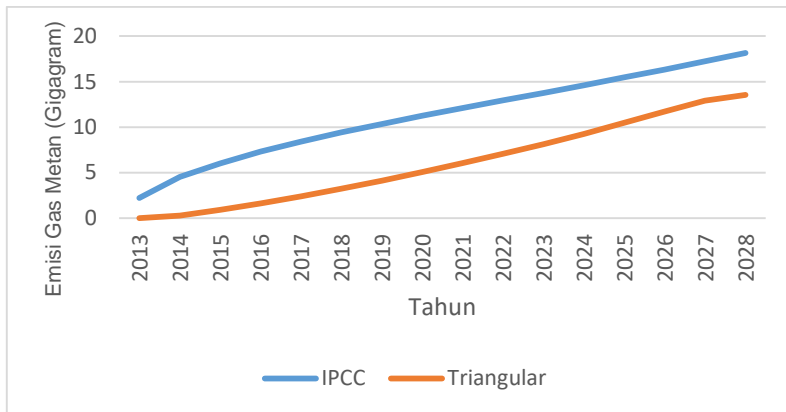
Metan yang dihasilkan dari sampah di TPA Benowo yaitu sebesar 13.974.161.122,89 m^3 . Metan dihasilkan dari proses degradasi sampah secara cepat yaitu 5 tahun dan proses degradasi sampah secara lambat yaitu 15 tahun. Metan yang dihasilkan kemudian dikonversikan yang sebelumnya dalam satuan volume menjadi satuan berat dalam satuan Gigagram agar bisa dibandingkan dengan perhitungan menggunakan metode IPCC. Perhitungan berat gas metan yang diproduksi yaitu:

$$\begin{aligned}
 \text{Densitas gas metan} &= 0,7168 \text{ gram/liter} \\
 &= 0,0072 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Total gas metan} &= 13.974.161.122,89 \text{ m}^3 \\
 \text{Berat gas metan} &= \text{Densitas gas metan} \times \text{Total gas} \\
 &= 0,0072 \text{ kg/m}^3 \times 13.974.161.122,89 \text{ m}^3 \\
 &= 100.166.786,9 \text{ kg} \\
 &= 100,166 \text{ Gigagram}
 \end{aligned}$$

Gas metan yang dihasilkan dari perhitungan menggunakan *triangular method* yaitu sebesar 100,166 Gigagram atau sebesar 100166 ton. Hasil tersebut merupakan total akumulasi emisi gas metan mulai dari awal ditimbun sampah diakhir terdegradasi. Berdasarkan hasil perhitungan pada sub bab 4.2.2, bahwa hasil perhitungan emisi gas metan berdasarkan metode IPCC *Guideline* skenario 1 yaitu sebesar 180,047 Gigagram atau 180.047 ton. Perhitungan hasil dari *Triangular Method* lebih kecil dibandingkan dengan metode IPCC *Guideline* 2006. Metode IPCC mengasumsikan bahwa metan diemisikan oleh sampah langsung ditahun yang sama setelah sampah tersebut ditimbun. *Triangular Method* memberikan perhitungan lebih realistis dengan mengasumsikan bahwa sampah yang masuk mengemisikan gas metan menjadi dua bagian yaitu terdekomposisi cepat dan terdekomposisi lambat (Kumar dkk.,2004). Salah satu kelebihan dari metode IPCC adalah mampu mengestimasi emisi gas metan meskipun data yang dibutuhkan kurang lengkap.

Perhitungan menggunakan metode IPCC *Guidelines* 2006 mempertimbangkan aspek iklim, kecepatan produksi gas metan, dan adanya faktor oksidasi pada proses munculnya gas metan (Chakraborty dkk., 2011). Faktor yang menimbulkan adanya perbedaan kuantitas antara metode IPCC *Guidelines* dan *Triangular Method* adalah perbedaan laju dekomposisi dari masing masing sampah organik yang berubah menjadi gas metan (Abualqumboz dkk., 2016). Perbedaan signifikan terkait produksi

gas metan dari sampah di TPA Benowo disebabkan perbedaan besarnya sampah yang terdegradasi di dalam TPA. Metode IPCC mengasumsikan sampah yang terdegradasi dan memproduksi gas metan yaitu sebesar 74,2% dari sampah yang ditimbun sedangkan sampah yang terdegradasi berdasarkan asumsi metode *triangular* yaitu sebesar 52,4% dari sampah yang ditimbun. Perbandingan emisi gas metan antara metode *triangular* dan IPCC dalam satuan Gigagram dapat dilihat pada Gambar 4.11. Sumbu X menggambarkan tahun produksi gas metan dan sumbu Y adalah besaran gas metan yang dihasilkan dari proses degradasi sampah dalam satuan Gigagram.



Gambar 4. 11 Laju Emisi Gas Metan

4.4 Analisa Menggunakan Metode AHP

Penelitian ini menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) yang berfungsi untuk membandingkan dan memilih teknologi yang cocok untuk mengelola emisi gas metan di TPA Benowo. Pemilihan teknologi mempertimbangkan adanya aspek teknis dan aspek lingkungan. Aspek lingkungan yang dipertimbangkan yaitu kemampuan *removal* emisi gas metan dan potensi polutan yang timbul akibat adanya proses. Aspek teknis yang dipertimbangkan adalah pengaplikasian teknologi, pemanfaatan hasil dari proses teknologi, pengoperasian teknologi,

perawatan teknologi, dan komposisi sampah yang ditimbun. Teknologi yang dibandingkan yaitu mengkonversi gas metan menjadi listrik menggunakan teknologi *Internal Combustion Engine*, mengkonversi gas metan menjadi biogas yaitu *Compressed Natural Gas*, dan dibakar menggunakan sistem *Enclosed Flaring*. Hierarki AHP dapat dilihat pada Gambar 3.4. Penggunaan metode AHP dengan *software Expert Choice* memerlukan penilaian untuk mengukur dan memilih teknologi pengelolaan emisi gas metan. Penilaian dilakukan menggunakan kuosioner yang diisi oleh orang yang ahli dan berkompeten dalam bidangnya. Penilaian oleh ahli akan menghasilkan hasil penilaian yang konsisten dan *valid*.

Penilaian pertama yang dilakukan adalah membandingkan antara aspek teknis dan lingkungan. Perbandingan dilakukan untuk membobotkan dari kedua aspek tersebut mana yang lebih penting. Berdasarkan penilaian, aspek lingkungan memiliki nilai 0,542 sedangkan aspek teknis memiliki nilai 0,458. Aspek lingkungan lebih penting dibandingkan dengan aspek teknis. Pemilihan teknologi pengelolaan emisi gas metan yang tepat dan mementingkan aspek lingkungan memiliki beberapa keuntungan antara lain mengurangi emisi gas metan yang dikeluarkan ke lingkungan dikarenakan gas metan merupakan emisi terbesar kedua dari kegiatan manusia. Manfaat lain yang didapatkan yaitu meningkatkan kualitas udara di sekitar *landfill* dikarenakan tidak dilepaskannya gas metan ke udara dan dapat mengurangi kerugian keuangan yang timbul akibat adanya polusi gas metan (EPA, 2008). Pembobotan antara aspek teknis dan lingkungan memiliki tingkat inkonsistensi 8% atau 0,08. Hasil Penilaian aspek teknis dan lingkungan dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 12 Perbandingan Aspek Teknis dan Lingkungan

Langkah selanjutnya adalah membandingkan dan mengukur tingkat kepentingan dari kriteria masing masing aspek teknis dan aspek lingkungan. Aspek teknis dibagi menjadi 5 kriteria

dan aspek lingkungan dibagi menjadi dua kriteria. Berdasarkan hasil pembobotan kriteria pada aspek teknis, pemanfaatan memiliki nilai tertinggi yaitu 0,572 kemudian diikuti oleh pengaplikasian dengan nilai 0,156 , pengoperasian memiliki nilai 0,150 , perawatan memiliki nilai 0,087 , dan komposisi sampah memiliki nilai 0,034. Berdasarkan nilai tersebut maka dari aspek teknis urutan tingkat kepentingan dari yang paling penting hingga biasa saja yaitu pemanfaatan, pengaplikasian, pengoperasian, perawatan, dan komposisi sampah. Pemanfaatan dari hasil teknologi pengelolaan emisi gas metan menjadi salah satu kriteria penting dalam pemilihan teknologi pengelolaan emisi gas metan. Gas metan mampu dimanfaatkan menjadi listrik dan biogas sehingga mempunyai nilai keuntungan bagi masyarakat sekitar dan pengelola *landfill* (EPA, 2017). Perbandingan untuk kriteria pada aspek teknis memiliki nilai inkonsistensi 10%. Nilai untuk pembobotan kriteria aspek teknis dapat dilihat pada Gambar 4.13.



Gambar 4. 13 Perbandingan Kriteria Aspek Teknis

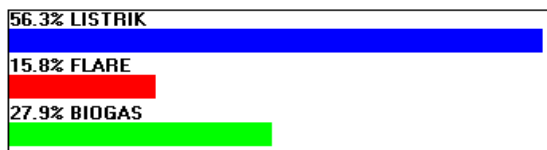
Perbandingan untuk aspek lingkungan dilakukan pada 2 kriteria yaitu kemampuan *removal* emisi gas metan dan potensi polutan yang timbul akibat adanya proses. Berdasarkan hasil penilaian dari ahli, kemampuan *removal* emisi gas metan memiliki nilai sebesar 0,875 dan nilai untuk potensi polusi dari proses yaitu 0,125. Kemampuan *removal* emisi gas metan memiliki tingkat kepentingan lebih tinggi dibandingkan dengan kriteria potensi polusi yang ditimbulkan oleh proses teknologi. Gas metan harus bisa dihilangkan atau direduksi secara efektif agar tidak menimbulkan dan meningkatkan polusi untuk lingkungan. Teknologi konversi gas metan menjadi listrik dan biogas diharapkan dapat merubah 100% gas metan yang diambil sedangkan teknik *enclosed flaring* memiliki tingkat penghancuran gas metan sebesar 90% (Tayyeba dkk., 2015). Pembobotan untuk aspek lingkungan memiliki inkonsistensi sebesar 6%. Hasil dari

pembobotan untuk kriteria pada aspek lingkungan dapat dilihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4. 14 Perbandingan Kriteria Aspek Lingkungan

Tahap selanjutnya dari metode ini adalah membandingkan antara teknologi. Perbandingan ketiga teknologi dilakukan menggunakan pembobotan yang telah dilakukan setiap kriteria pada aspek teknis dan aspek lingkungan. Perbandingan ketiga teknologi pengelolaan emisi gas metan pada aspek teknik untuk konversi menjadi listrik memiliki nilai sebesar 0,563, konversi emisi gas metan menjadi biogas memiliki nilai sebesar 0,279, dan pembakaran menggunakan metode *Enclosed Flaring* memiliki nilai sebesar 0,158. Berdasarkan hasil pada ketiga teknologi, maka konversi menjadi listrik lebih baik dibandingkan konversi menjadi biogas dan diikuti oleh pembakaran menggunakan *Enclosed Flaring*. Teknologi konversi gas metan menjadi listrik menjadi yang terbaik dikarenakan penilaian kriteria pemanfaatan pada aspek teknis memiliki bobot yang besar sehingga konversi menjadi listrik menjadi yang terbaik. Teknologi konversi gas metan menjadi listrik memiliki potensi yang tinggi dalam sektor energi dan menjaga lingkungan dari suatu negara. Iran telah mampu merubah gas metan dari *landfill* menjadi 5005,4 – 5548,8 GigaWattHours listrik pertahunnya dan mengurangi emisi gas metan dan CO₂ dalam inventarisasi nasional sebesar 4% dari sektor limbah (Rajaeifar dkk., 2017). Tingkat inkonsistensi pada penilaian teknologi untuk aspek teknis yaitu sebesar 9%. Hasil dari penilaian teknologi pada aspek teknis dapat dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4. 15 Penilaian Teknologi pada Aspek Teknis

Perbandingan teknologi pengelolaan gas metan pada aspek lingkungan dilakukan dengan mempertimbangkan dua kriteria yaitu *removal* emisi gas metan dan potensi polutan yang timbul dari proses. Berdasarkan penilaian, konversi menjadi listrik memiliki nilai 0,734 sedangkan konversi menjadi biogas memiliki nilai sebesar 0,173 dan pembakaran menggunakan metode *Enclosed Flaring* memiliki nilai sebesar 0,093. Nilai tersebut memiliki arti bahwa konversi menjadi listrik lebih baik daripada teknologi konversi menjadi biogas dan pembakaran menggunakan metode *Enclosed Flaring*. Tingkat inkonsistensi pada perbandingan teknologi mempertimbangkan aspek lingkungan sebesar 6%. Hasil dari penilaian teknologi pengelolaan emisi gas metan dapat dilihat pada Gambar 4.16.



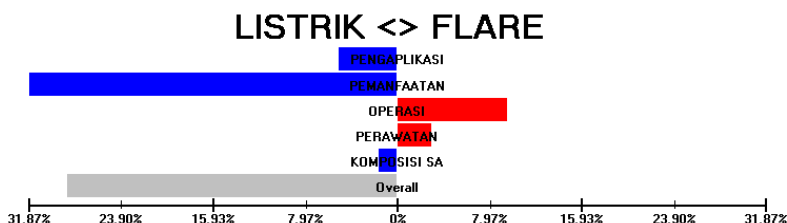
Gambar 4. 16 Penilaian Teknologi pada Aspek Lingkungan

Langkah selanjutnya adalah menggabungkan penilaian pada aspek teknis dan aspek lingkungan menjadi satu kesatuan utuh penilaian. Hasil penggabungan penilaian pada aspek teknis dan lingkungan, konversi menjadi listrik memiliki nilai sebesar 0,648 sedangkan konversi menjadi biogas memiliki nilai sebesar 0,226 dan menggunakan metode *Enclosed Flaring* memiliki nilai sebesar 0,126. Nilai ketiga teknologi tersebut berarti konversi menjadi listrik lebih baik daripada konversi menjadi biogas dan pembakaran menggunakan metode *Enclosed Flaring*. Tingkat inkonsistensi pada penggabungan penilaian aspek teknis dan lingkungan yaitu sebesar 8%. Grafik hasil penggabungan penilaian pada ketiga teknologi dapat dilihat pada Gambar 4.17.



**Gambar 4. 17 Penilaian Teknologi Pengelolaan Emisi Gas
Metan**

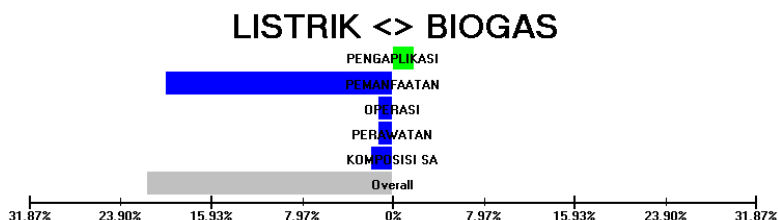
Perbandingan dilakukan antara masing masing teknologi dengan teknologi lainnya untuk mengetahui teknologi yang lebih baik apabila jika dibandingkan. Perbandingan pertama yang dilakukan adalah berdasarkan aspek teknis pada teknologi listrik dan *flaring*. Teknologi listrik memiliki keunggulan pada kriteria pengaplikasian, pemanfaatan, dan komposisi sampah. Teknologi konversi gas metan menjadi listrik mudah untuk diaplikasikan dan telah digunakan sebagai teknologi untuk memaksimalkan potensi gas metan menjadi listrik. 70% *landfill* di Amerika Serikat telah mengkonversikan gas metannya menjadi listrik dengan kapasitas merubah 1 juta ton di *landfill* dapat diubah menjadi 0,8 MegaWatt listrik (EPA, 2015). Teknologi *flaring* memiliki keunggulan dalam kriteria pengoperasian dan perawatan. *Flaring* mudah untuk dioperasikan dikarenakan tidak dibutuhkannya *pretreatment* untuk gas metan yang akan dibakar. Perawatannya mudah dikarenakan komponen yang harus dijaga tidak terlalu banyak. *Flaring* hanya harus menjaga *supply* udara yang digunakan agar mampu terjadi pembakaran sempurna sehingga mampu memenuhi *standard* emisi yang ada sesuai dengan peraturan (SEPA, 2017). Perbandingan teknologi listrik dan *flare* pada aspek teknis dapat dilihat di Gambar 4.18.



Gambar 4. 18 Perbandingan Teknologi Lisrik dan Flare pada Aspek Teknis

Perbandingan selanjutnya adalah teknologi listrik dan listrik dan biogas. Teknologi listrik memiliki keunggulan pada kriteria pemanfaatan, pengoperasian, perawatan, dan komposisi sampah. Teknologi konversi gas metan menjadi listrik memiliki keunggulan dikarenakan mempunyai potensi pemanfaatan yang

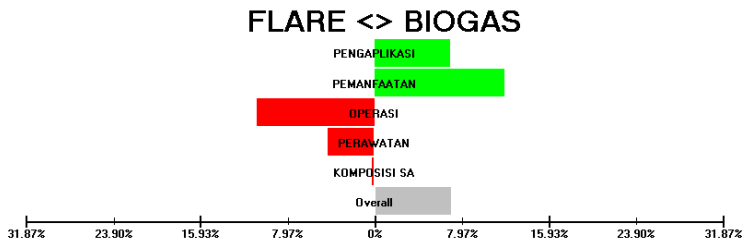
lebih tinggi dibandingkan dengan biogas. Teknologi listrik mampu memproduksi mulai dari 800kW hingga 3 MW dan menggunakan efisiensi energi yang kecil apabila panas dari *landfill* mampu untuk diambil. Konsentrasi gas metan yang dibutuhkan untuk mengkonversi menjadi listrik menggunakan teknologi ini adalah minimum 45%. Perawatan dan pengoperasian mudah dikarenakan hanya memerlukan *pretreatment dewatering*. Teknologi konversi gas metan menjadi biogas membutuhkan *pretreatment* yang banyak antara lain *water scrubbing*, *membrane separation*, *molecular sieve* dan apabila dialirkan menggunakan pipa ke masyarakat untuk digunakan maka diperlukan jalur pipa yang layak dan baik (EPA, 2016). Perbandingan teknologi listrik dan biogas dapat dilihat pada Gambar 4.19.



**Gambar 4. 19 Perbandingan Teknologi Listrik dan Biogas
pada Aspek Teknis**

Perbandingan terakhir pada aspek teknis dilakukan antara teknologi *flare* dan biogas. Teknologi *flare* memiliki keunggulan pada kriteria pengoperasian dan perawatan dikarenakan pengoperasiannya yang mudah dan perawatannya yang tidak terlalu sulit. Teknologi biogas memiliki keunggulan pada kriteria pengaplikasian dan pemanfaatan. Keuntungan utama dari *flaring* adalah mampu menghilangkan emisi yang membahayakan, menghilangkan VOC dan bau yang ada di *landfill* namun dengan cara pembakaran maka gas metan kehilangan potensinya sebagai asset yang mampu dimanfaatkan. Gas metan mampu dimanfaatkan sebagai biogas dalam bentuk *liquid* maupun

compressed yang dapat dijual maupun dialirkan ke masyarakat menggunakan pipa sehingga konversi menjadi biogas merupakan pilihan yang bijak dalam memanfaatkan gas metan sebagai salah satu sektor energi yang terbarukan (Ramana dkk., 2012). Perbandingan antara teknologi *flare* dan biogas dapat dilihat pada Gambar 4.20.

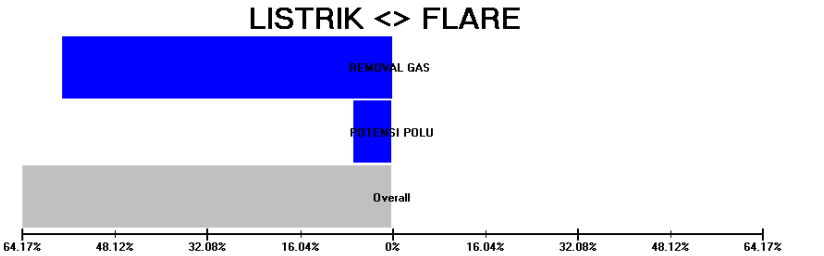


**Gambar 4. 20 Perbandingan Teknologi Flare dan Biogas
pada Aspek Teknis**

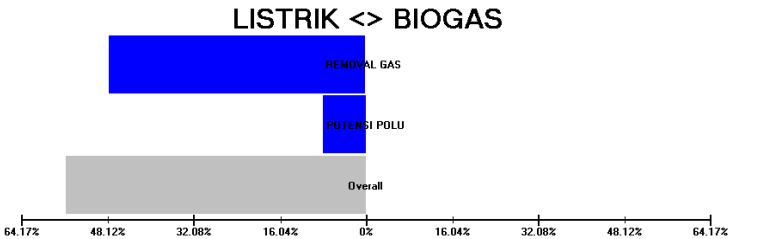
Perbandingan dilakukan pada aspek lingkungan dengan 2 kriteria yaitu *removal* gas metan dan potensi polusi dari proses. Perbandingan pertama dilakukan pada teknologi listrik dan *flare* dan konversi gas metan menjadi biogas. Teknologi listrik memiliki keunggulan dalam kriteria *removal* gas metan dan minimnya potensi polutan yang timbul dari teknologi. Teknologi konversi gas metan menjadi listrik memiliki kemampuan untuk *removal* gas metan 100% dan mengkonversinya menjadi listrik dan dapat dimanfaatkan. Proses yang terjadi dalam pengkonversian memiliki potensi polusi yaitu kebisingan dan CO.

Teknologi penghancuran gas metan oleh metode *flaring* mampu *removal* gas metan sebesar 95-99% apabila pengoperasiannya secara kontinyu dan ideal terkait *supply* udara yang digunakan dan apabila menggunakan *enclosed flaring* maka dapat menjaga panas tetap didalam sistem dan meningkatkan efisiensi. Kerugian yang terjadi adalah adanya kebisingan dan apabila *enclosed flaring* tidak berjalan secara optimal adalah dapat

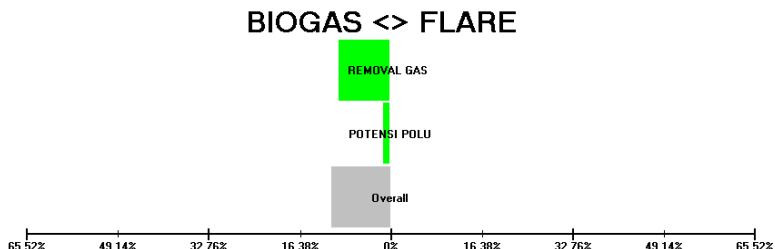
munculnya dioxin, furan, hidrokarbon, dan NOx sehingga penggunaanya harus dipantau dalam radius 1 km. Teknologi biogas memiliki kekurangan antara lain dari proses *pretreatment* terdapat residu yang harus diolah agar tidak terjadi polusi (Tsatsarelis dkk., 2015). Perbandingan teknologi listrik dan *flaring* dapat dilihat pada Gambar 4.21, perbandingan teknologi listrik dan biogas dapat dilihat pada Gambar 4.22, dan perbandingan teknologi *flaring* dan biogas dapat dilihat pada gambar 4.23.



Gambar 4. 21 Perbandingan Teknologi Listrik dan Flare pada Aspek Lingkungan



Gambar 4. 22 Perbandingan Teknologi Listrik dan Biogas pada Aspek Lingkungan



Gambar 4. 23 Perbandingan Teknologi Biogas dan *Flare* pada Aspek Lingkungan

4.5 Konversi Gas Metan menjadi Listrik

Teknologi terbaik berdasarkan hasil analisa menggunakan metode AHP dengan bantuan *software expert choice* adalah teknologi konversi gas metan menjadi listrik. Teknologi yang dipilih adalah penggunaan *Internal Combustion Engine*. EPA (2015) telah melakukan penelitian secara menyeluruh di Amerika Serikat dan mendapatkan bahwa 1 juta ton sampah dapat dikonversikan menjadi 0,8 Megawatt listrik. Berdasarkan Tabel 4.4 tentang proyeksi timbunan sampah di TPA Benowo, maka dapat dihitung besarnya jumlah listrik yang dapat dikonversikan dari sampah. Hasil konversi gas metan menjadi listrik dapat dilihat pada Tabel 4.14. Contoh perhitungan konversi gas metan menjadi listrik pada tahun 2013 yaitu :

- Jumlah sampah tahun 2013 = 500,047 Gigagram
= 500.047 ton
- Konversi sampah jadi listrik = $\frac{\text{Jumlah Sampah tahun 2013}}{1.000.000 \text{ ton}} \times 0,8 \text{ MW}$
= $\frac{500.047 \text{ ton}}{1.000.000 \text{ ton}} \times 0,8 \text{ MW}$
= 0,400 MegaWatt Listrik

Tabel 4. 14 Konversi Gas Metan menjadi Listrik Berdasarkan EPA

No	Tahun	Jumlah sampah (Gg)	Konversi ke Listrik (MW)
1	2013	500,047	0,400
2	2014	531,403	0,425
3	2015	539,164	0,431
4	2016	575,096	0,460
5	2017	595,889	0,477
6	2018	622,720	0,498
7	2019	650,759	0,521
8	2020	680,061	0,544
9	2021	710,683	0,569
10	2022	742,683	0,594
11	2023	776,124	0,621
12	2024	811,071	0,649
13	2025	847,591	0,678
14	2026	885,756	0,709
15	2027	925,639	0,741
16	2028	967,318	0,774

Penelitian lain dilakukan oleh Haq (2012) tentang studi terkait potensi pembangkit listrik tenaga sampah di Kota Banjarmasin. Peneliti menghitung potensi gas metan dari TPA Basirih di Banjarmasin lalu diproses dan dikonversi menjadi listrik untuk penggunaan sendiri dan memiliki kelebihan listrik yang kemudian dijual ke PT. PLN Persero. TPA Basirih memiliki potensi gas metan sebesar 8.176.975 m³/tahun. Energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit sebesar 12.848.929 kWh sedangkan energi listrik yang digunakan untuk pemakaian sendiri sebesar 866.162 kWh sehingga energi listrik yang dapat dijual ke PT.PLN (Persero) sebesar 11.956.766 kWh. Teknologi yang digunakan pada studi tersebut adalah teknologi *Internal Combustion Engine* yang dilengkapi dengan fasilitas *heat recovery* untuk meningkatkan efisiensi produksi listrik. Rumus perhitungan energi listrik yang dihasilkan dari gas metan yaitu

$$Pg = \frac{Qt \times Ho}{3600} \dots\dots\dots 4.3$$

Keterangan

Pg = Daya yang dihasilkan (kW)

Qt = Produksi gas LFG (m³/jam)

Ho = Nilai kalori LFG (kJ/m³)

Produksi gas yang digunakan pada perhitungan ini menggunakan hasil perhitungan dari metode *IPCC Guidelines 2006* skenario 1 sesuai dengan tabel 4.5. Nilai kalor yang digunakan adalah berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Naranayan dkk. (2007) yaitu berkisar antara 16.785 kJ/m³ hingga 20.495 kJ/m³. Contoh perhitungan konversi gas metan menjadi listrik pada tahun 2013 yaitu :

- Produksi gas metan tahun 2013 = 35.042 (m³/jam)

- Nilai kalor gas metan = 16.785 kJ/m³

$$\begin{aligned} \cdot Pg &= \frac{Qt \times Ho}{3600} \\ &= \frac{35.042 \left(\frac{m^3}{jam} \right) \times 16.785 \text{ kJ/m}^3}{3600} \\ &= 163.383 \text{ kW} = 0,163 \text{ MegaWatt} \end{aligned}$$

Perhitungan dilakukan dari tahun pertama hingga tahun ke 15 dan dijumlahkan potensi listrik total yang didapatkan dari konversi gas metan menjadi listrik. Potensi listrik yang dihasilkan dari konversi gas metan menjadi listrik yaitu sebesar 13 MegaWatt. Potensi listrik terbesar yaitu pada tahun 2028 dikarenakan besarnya potensi listrik dipengaruhi oleh kuantitas sampah yang masuk. Listrik yang dihasilkan dari gas metan diharapkan dapat

dimanfaatkan agar dapat memiliki keuntungan baik secara ekonomi berupa penjualan dan secara lingkungan demi menjaga kualitas udara akibat adanya pengurangan reduksi gas metan yang terbuang ke alam (Tsai, 2005). Potensi gas metan menjadi listrik dapat dilihat pada Tabel 4.15

Tabel 4. 15 Konversi Gas Metan menjadi Listrik

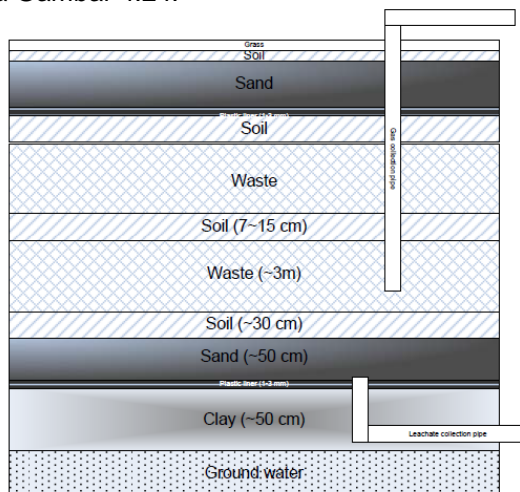
No	Tahun	Metan (Gg)	Listrik (kW)	Potensi Listrik (Megawatt)
1	2013	2,210	163.383,28	0,163
2	2014	4,531	334.935,22	0,334
3	2015	5,996	443.231,86	0,443
4	2016	7,309	540.316,61	0,540
5	2017	8,421	622.505,84	0,622
6	2018	9,425	696.764,16	0,696
7	2019	10,356	765.519,28	0,765
8	2020	11,238	830.722,35	0,830
9	2021	12,091	893.811,77	0,893
10	2022	12,930	955.860,23	0,955
11	2023	13,767	1.017.679,44	1,017
12	2024	14,608	1.079.894,72	1,079
13	2025	15,462	1.142.998,29	1,142
14	2026	16,333	1.207.387,41	1,207
15	2027	17,226	1.273.391,69	1,273
16	2028	18,144	1.341.292,87	1,341
Total Potensi Listrik				13,309

Hasil perhitungan konversi gas metan menjadi listrik lengkap dapat dilihat pada lampiran.

4.6 Program Pengelolaan Emisi Gas Metan

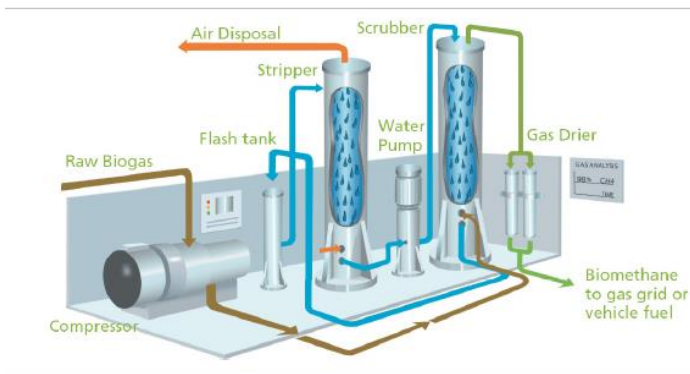
Gas metan hasil dari proses degradasi sampah yang terjadi di TPA Benowo tidak boleh dilepaskan secara langsung ke alam dikarenakan dapat membahayakan lingkungan dan masyarakat. Gas metan harus dikelola agar dapat meningkatkan nilai pemanfaatannya dan menjadi suatu kelebihan. Berdasarkan metode AHP pada sub bab 4.4, teknologi konversi gas metan menjadi listrik dipilih sebagai teknologi untuk mengolah emisi gas metan.

Gas metan tidak dilepaskan langsung ke alam karena berbahaya bagi masyarakat dan lingkungan. Sampah yang ditimbun di TPA, harus ditutup dengan lapisan penutup agar terjadi proses anaerobik dan menahan gas metan tidak langsung lepas ke alam. Sampah yang ditimbun di TPA harus memiliki lapisan pengaman di paling bawah tumpukan berupa geotekstil atau geomembran agar tidak mencemari tanah dan air tanah. Sampah yang sudah ditimbun ditutupi perharinya atau maksimal 1 minggu sekali dengan tanah dengan ketinggian optimum yaitu 7-15 cm. TPA yang akan ditutup akan diberikan lapisan tanah ditumpuk kembali dengan pasir dan di atasnya akan ditanam vegetasi yaitu rumput. Lapisan lapisan tersebut membuat suasana tumpukan menjadi anaerobik dan mencegah gas metan terlepas ke atmosfer. Kondisi anaerobik menyebabkan produksi gas dari TPA memiliki komposisi terbesar metan dan karbondioksida, dengan kuantitas yang sedikit dari nitrogen, oxygen and non-methane organic compounds (NMOCs). Pipa untuk mengambil gas metan dipasang secara vertical dan dikeluarkan menggunakan pompa (Naranayan dan Shresta, 2007). Lapisan penimbunan sampah di TPA dapat dilihat pada Gambar 4.24.



Gambar 4. 24 Penimbunan Sampah di TPA

Gas yang diambil dari pipa di TPA mengandung berbagai macam gas antara lain metan, karbondioksida, nitrogen, sulfur, dan gas lainnya. Gas yang diambil harus dimurnikan terlebih dahulu agar mampu mendapatkan tingkat kemurnian yang bagus agar dapat digunakan menjadi listrik. Gas nitrogen, sulfur, dan siloxen harus dikeluarkan dengan metode pengolahan utama. Pengolahan utama yang digunakan adalah adsorpsi dan absorbsi. Adsorpsi menghilangkan siloxen dengan menggunakan silika yang nantinya akan menghilangkan konsentrasi siloxen dalam gas. Absorpsi akan menghilangkan sulfur dengan cara mereaksikan sulfur dengan bahan kimia. Konsentrasi karbondioksida dikurangi dengan menggunakan metode *water scrubbing*. *Water scrubbing* memanfaatkan air untuk melakukan dilusi pada gas yang masuk kedalam sistem sehingga terjadi proses reduksi karbondioksida. Gas dari TPA dimasukkan kedalam reaktor yang kemudian disemprot air bertekanan dan karbondioksida, nitrogen, dan oksigen akan larut bersama dengan air sedangkan gas metan yang memiliki nilai kapabilitas dilusi yang lebih kecil akan melewatinya dan menjadi gas metan murni dengan tingkat kemurnian 96-99%. Gas yang tersisihkan akan dikumpulkan dan dibakar menggunakan metode *flaring* (GMI, 2012). Pengolahan menggunakan *water scrubbing* dapat dilihat pada Gambar 4.25.



Gambar 4. 25 Teknologi Water Scrubbing

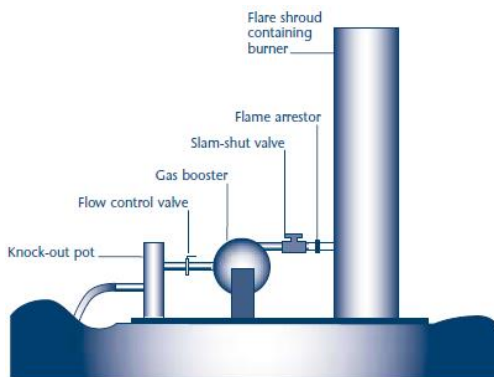
Teknologi gas metan yang dikonversi menjadi listrik yaitu menggunakan *Internal Combustion Engine*. Prinsip kerja dari *Internal Combustion Engine* yaitu dengan cara memicu gas dari TPA dengan udara di dalam ruang pembakaran. Teknologi ini mudah untuk dibangun dan mampu bekerja hingga 20 tahun penggunaan apabila dirawat dengan baik. Teknologi ini memiliki tingkat kebisingan yang tinggi yaitu sebesar 80 – 110 db sehingga diperlukan teknologi untuk meredam kebisingan (Tsatsarelis, dkk., 2015). Mesin dapat ditingkatkan efisiensi kerjanya apabila dapat dilakukan *recovery* panas dari TPA. Sistem *recovery* yang digunakan adalah *Combine Heat and Power (CHP)*. *Combined heat and power (CHP)* atau sering disebut sistem kogenerasi adalah serangkaian atau pembangkitan secara bersamaan beberapa bentuk energi yang berguna (biasanya mekanikal dan termal) dalam satu sistem yang terintegrasi. Sistem CHP terdiri dari sejumlah komponen individu mesin penggerak mula (*prime mover*), generator, pemanfaatan kembali panas (*heat recovery*), dan sambungan listrik tergabung menjadi suatu integrasi (Haq, 2012). Teknologi konversi gas metan menjadi listrik dapat dilihat pada Gambar 4.26.



Sumber: EPA (2015)

Gambar 4. 26 Teknologi *Internal Combustion Engine*

Teknologi konversi gas metan menjadi listrik menggunakan *Internal combustion engine* memiliki rentang pengolahan gas sebesar 0,8 – 3 MW untuk tiap mesin. Produksi gas metan yang berada dibawah 0,8 MW tidak tepat untuk dikonversikan dikarenakan terlalu sedikit hingga akan menyebabkan kerugian (Naranayan dan Shresta, 2007). Teknologi konversi gas metan menjadi listrik digunakan mulai tahun ke 8 atau pada tahun 2020. Teknologi *flaring* dibutuhkan untuk mengolah emisi gas metan yang terproduksi dari proses degradasi sampah di TPA. *Flaring* adalah teknologi pembakaran emisi gas metan di dengan pencampuran dengan oksigen untuk membuat terjadinya pembakaran sempurna. *Flaring* menggunakan teknologi *Enclosed Flaring* digunakan untuk menjaga panas tetap berada di dalam sistem dan membuat sistem pembakaran bekerja dalam suhu pembakaran yang optimal. Komponen yang diperlukan dalam teknologi ini yaitu pembersih gas yang berguna untuk filter emisi pembakaran, *blower* untuk memasukkan gas dari TPA ke sistem, penahan api untuk mencegah api menyebar keluar dari sistem, ruang pembakaran, detektor api untuk mengetahui kondisi pembakaran, dan pemicu api (SEPA, 2016). Teknologi *flaring* dapat dilihat pada Gambar 4.27.



Gambar 4. 27 Teknologi Flaring.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini yaitu :

1. a. Proyeksi gas metan dari perhitungan menggunakan metode *IPCC Guidelines 2006* tier 2 yang untuk kondisi sampah eksisting memiliki total sebesar 180,047 Gigagram. Proyeksi gas metan sebesar 172,216 Gigagram dan 69,014 Gigagram jika menggunakan skenario proses komposting sampah di sumber. Proyeksi gas metan sebesar 170,796 Gigagram dan 62,285 Gigagram jika menggunakan skenario proses komposting dan pemilahan sampah di sumber.
b. Hasil perhitungan menggunakan metode *Triangular Method* yaitu sebesar 100,166 Gigagram.
2. Program pengelolaan emisi gas metan yang dipilih adalah mulai tahun pertama menggunakan teknologi *flaring* untuk membakar gas metan dan menggunakan teknologi konversi gas metan menjadi listrik pada tahun ke 8.

5.2 Saran

Beberapa saran yang diberikan berkaitan terkait penelitian ini adalah

1. Meneliti nilai DOC secara langsung untuk perhitungan *IPCC Guidelines*
2. Perbandingan untuk memilih teknologi pengelolaan emisi gas rumah kaca mempertimbangkan aspek finansial.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Agustia, Y.A. 2013. Emisi Gas Rumah Kaca dari Pengelolaan dan Pengangkutan Sampah di Kecamatan Gubeng. Tugas Akhir. ITS, Surabaya.
- Ahmed, S.I., Johari, A., Hashim, H., Lim, J.S., Jusoh, M., Mat, R., Alkali, H. 2015. Economic and Environmental Evaluation of Landfill Gas Utilisation : A Multi Perioed Optimisation Approach for Low Carbon Regions. *International Biodeterior & Biodegradation* 2015:102:191-201
- Anvaria, Shinfu W., Pandebesie, Ellina S., Warmadewanti, IDAA. 2013. Life Cycle Assessment (LCA) pada Pengelolaan Sampah di TPA Benowo Kota Surabaya. Tugas Akhir. ITS, Surabaya.
- Aye, L. dan Widjaya E.R. 2006. Environmental and Economics Analyses of Waste Disposal Option for Traditional Markets in Indonesia. *Waste Management*. Vol 26 :1180-1191
- Badan Standarisasi Nasional. 1994. "SNI 19-3964-1994 Tentang Metode Pengambilan dan Pengukuran Contoh Timbulan dan Komposisi Sampah Perkotaan". Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. 1995. SNI 19-3983-1995 tentang Spesifikasi Timbulan Sampah Kota Sedang dan Kota Kecil. Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. 2002. SNI 19-2454-2002 Tentang Tata Cara Teknik Operasional Pengelolaan Sampah Perkotaan. Jakarta
- Barfod, M.B. 2017. Graphical and technical options in Expert Choice for group decision making. DTU Lyngby: Technical University of Denmark, Transport.
- Chakraborty, M., Sharma, C., Pandey, J., Singh, N., Gupta, P.K. 2011. Methane emission estimation from landfills in Delhi: A comparative assessment of different methodologies. *Atmospheric Environment* 45: 7135-7142
- Damanhuri, E. dan Padmi, T. 2010. Pengelolaan Sampah. Program Studi Teknik Lingkungan FTSL ITB.
- Dinas Kebersihan dan Pertamanan (DKP) Kota Surabaya. 2012. Surabaya, Indonesia.

- EEA. 2014. Annual European Union Greenhouse Gas Inventory 1990-2011 and Inventory Report 2014, European Environment Agency.
- EPA. 2008. Landfill Methane Outreach Program: Basic Information. U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.
- EPA. 2010. Methane and Nitrous Oxide Emission from Natural Sources. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- EPA. 2014. Global Mitigation of Non – CO₂ Greenhouse Gases: 2010-2030. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- EPA. 2015. Landfill Methane Utilization. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- EPA. 2017. LFG Energy Project Development Handbook. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- Gell, K., Groniege, V.J., Cayuela, M.L. 2011. Residues of Bioenergy Production Chain as Soil Amendment: Immediate and Temporal Phytotoxicity. *J Hazardous Mater.* 186(2-3), 2017-2025
- Global Methane Initiative. 2012. International Best Practices Guide for LFGE Project. Landfill Gas Energy Utilization Technologies : 33-50
- Hamali, S. 2015. Pengambilan Keputusan Manajemen Menggunakan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP).
- Haq, A.N. 2012. Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Sampah di Kota Banjarmasin. Jurusan teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.
- Hariato, Y.E. 2016. Dinamika konflik pengelolaan sampah (Studi Deskriptif Konflik Realistik Pengelolaan Sampah TPA Benowo Surabaya). 5(2):1-15 ISSN 2303 1166.
- Indawati, L. 2012. Optimasi Kinerja Rumah Kompos dalam Pengurangan Sampah Kota Surabaya. Tugas Akhir. ITS, Surabaya.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol 5, Waste, Chapter 3, Solid Waste Disposal.
- Jha, A. K., Sharma, C., Singh, N., Ramesh, R., Purvaja, R., Gupta, P. K. 2008. Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid

- Waste Management in Indian Mega Cities: A case Study of Chennai Landfill Sites. *Chemosphere* 71, 4. 750-758
- Kumar, S., Gaikwad, S.A., Shekdar, A.V., Kshirsagar, P.S., Singh, R.N. 2004. Estimation Method for National Methane Emission from Solid Waste Landfills. *Atmospheric Environment*: 38 3841-3487 India.
- Kementrian Lingkungan Hidup.2012. Peraturan tentang Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional Buku II Volume 4 Metodologi Perhitungan Tingkat Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Pengelolaan Limbah.
- Malik, V.A., Lerner, S.L. dan Maclean, L.D. 1987. Electricity, Metan and Liquid Carbon Dioxide Production from Landfill Gas. *Gas Separation & Purification*. Vol 1 hal:77-83
- Marten, A.L., Newbold, S.C,. 2012. Estimating The Social Cost of Non CO₂ GHG Emission: Metan and Nitrous Oxide. *Energy Policy* 51: 957 – 972.
- Motasem, S.A., Amirhossen, A., Nurul, I.M. 2016. Greenhouse gas emissions estimation from proposed El Fukhary Landfill in the Gaza Strip. *Journal of the Air & Waste Management Association* Vol. 66 ,
- Naranayan, G. dan Shresta, S. O. B. 2007. Landfill Gas – A Fuel for Internal Combustion Engine Applications. Western Michigan University, Kalamazoo, MI, USA.
- NIST. 2011. Metan. Material Measurement Laboratory. U.S. Secretary of Commerce on behalf of United State of America dipetik Desember 25, 2016 dari <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi>
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 03/Prt/M/2013 Tentang Penyelenggaraan Prasarana Dan Sarana Persampahan Dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga Dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga
- PPSP Kelompok Kerja Sanitasi Kota Surabaya. 2011. Memorandum Program Sektor Sanitasi Kota Surabaya tahun 2011. Surabaya.
- Peavey, H.S., Donald, R.R., Gorge,G. 1995. Environmental Engineering. McGraw-Hill Book Co, Singapore.
- Purwanta, Wahyu. 2009. Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari Sektor Sampah Perkotaan di Indonesia. Jurusan

- Pusat Sarana Pengendalian Dampak Lingkungan Hidup. 2011. Laporan Studi Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari Sumber Limbah Domestik. Bidang Pembinaan Sarana Teknis dan Peningkatan Kapasitas Hidup Kementerian Lingkungan Hidup dipetik Desember 25, 2016 dari <http://www.kemenlh.go.id>
- Rajaeifar, M.A., Ghavanati, H., Dashti, B.B., Heijungs, R., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M. 2017. Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review. *Renewable and Sustainable Energy Review* 79: 414-439.
- Rajaram, V., Siddiqui, F.Z dan Khan, M.E. 2012. *From Landfill Gas To Energy Technologies and Challenges*. CRC Press: Netherland
- Ramani, T., Sprague, S., Zietsman, J., Kumar, S., Kumar, R., Krishnan, A. 2012. Landfill Gas to Energy Applications in India: Prefeasibility Analysis of Mumbai Landfills. *Journal of Hazardous Waste, Toxic, and Radioactive* 16: 250-257.
- Rencana Aksi Nasional. 2010. *Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca . Rancangan Peraturan Presiden Republik Indonesia*.
- Saaty, T. L. 1993. *Pengambilan Keputusan Bagi Para Pemimpin, Proses Hirarki Analitik untuk Pengambilan Keputusan dalam Situasi yang Kompleks*. Pustaka Binama Pressindo.
- Scarlat, N., Motola, V., Dallemand, J.F., Ferrario, F.M., Mofor, L. 2015. Evaluation of Energy Potential of Municipal Solid Waste from African Urban Areas. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2015:50:50:1269-86.
- Scheutz, C., Samuelsson, J., Fredenslund, A.M., Kjeldsen, P., 2011. Quantification of Multiple Metan Emission Sources at Landfills Using A Double Tracer Terchnique. *Waste Manage.* 31 (5). 1009-1017
- SEPA. 2004. *Guidance on Gas Treatment Technologies for Landfill Gas Engines*. Environment Agency, Scotland
- SEPA. 2016. *Guidance on Landfill Gas Flaring Version 2.1*. Environment Agency, Scotland

- Sudarman. 2010. Meminimalkan Daya Dukung Sampah Terhadap Pemanasan Global. *Profesional* 8, 1: 1693-3745
- Supriyono., Wardhana, W.A., Sudaryo. 2007. Sistem Pemilihan Pejabat Struktural dengan Metode AHP. Sekolah Tinggi Teknik Nuklir (STTN) BATAN, Yogyakarta.
- Tayyeba, O., Olsson, M., Brandt, N. 2015. The Best MSW Treatment Option by Considering Greenhouse Gas Emissions Reduction: A Case Study in Georgia. *Waste Management and Research* 29[8]: 823 - 833
- Tchobanoglous G., Theisen H., dan Vigil S.A. 1993. *Integrated Solid Waste Management*. McGraw-Hill International Editions, Singapore.
- Tsatsarelis, T., Karagiannidis, A., Moussiopolous, N., Perkoulidis, G. 2015. Technologies of Landfill Gas Management and Utilization. Laboratory of Heat Transfer, Department of Mechanical Engineering, Aristotle University, Greece.
- Undang Undang Republik Indonesia Nomor 18 tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sampah.
- Uusitalo, V., Soukka, R., Hortalainenm M., Niskanen, A., dan Havukainen, J. 2013. Economics and Greenhouse Gas Balance on Biogas Use System in The Finnish Transportation Sector. *Renewable Energy*. Vol 51:132-140
- Wakadikar, K., Sil, A., Kumar, S., Kumar, R., Mudhoo, A. 2012. Influence of Sewage Sludge and Leachate on Biochemical Potential of Waste Biomass. *J Bioremed . & Biodegrad* S8-002.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan Emisi Gas Metan per Skenario

Lampiran 1. 1 Emisi Gas Metan Skenario 1

No	Tahun	Methane Generated							Methane Emission
		Food	Garden	Paper	Wood	Textile	Nappies	Total	
1	2013	1,918	0,358	0,116	0,064	0,000	0,000	2,456	2,210
2	2014	3,393	0,682	0,232	0,634	0,035	0,059	5,034	4,531
3	2015	4,466	0,961	0,341	0,706	0,070	0,118	6,662	5,996
4	2016	5,362	1,222	0,452	0,807	0,103	0,176	8,121	7,309
5	2017	6,075	1,456	0,560	0,894	0,137	0,235	9,357	8,421
6	2018	6,682	1,673	0,667	0,987	0,169	0,294	10,473	9,425
7	2019	7,218	1,876	0,774	1,084	0,202	0,352	11,506	10,356
8	2020	7,710	2,069	0,880	1,182	0,234	0,412	12,486	11,238
9	2021	8,175	2,252	0,986	1,284	0,266	0,471	13,434	12,091
10	2022	8,626	2,430	1,093	1,388	0,298	0,532	14,367	12,930
11	2023	9,073	2,604	1,200	1,495	0,330	0,593	15,296	13,767
12	2024	9,523	2,776	1,308	1,606	0,363	0,655	16,231	14,608
13	2025	9,981	2,947	1,418	1,720	0,395	0,719	17,180	15,462
14	2026	10,452	3,118	1,529	1,838	0,429	0,783	18,148	16,333
15	2027	10,937	3,291	1,641	1,960	0,462	0,849	19,140	17,226
16	2028	11,440	3,467	1,756	2,085	0,496	0,916	20,160	18,144

Lampiran 1. 2 Emisi Gas Metan Skenario 2 Reduksi 1

No	Tahun	Methane Generated							Methane Emission
		Food	Garden	Paper	Wood	Textile	Nappies	Total	
1	2013	1,893	0,281	0,116	0,064	0,000	0,000	2,354	2,119
2	2014	3,349	0,536	0,232	0,634	0,035	0,059	4,844	4,359
3	2015	4,408	0,754	0,341	0,706	0,070	0,118	6,398	5,758
4	2016	5,292	0,959	0,452	0,807	0,103	0,176	7,789	7,010
5	2017	5,996	1,143	0,560	0,894	0,137	0,235	8,965	8,068
6	2018	6,595	1,314	0,667	0,987	0,169	0,294	10,026	9,024
7	2019	7,124	1,473	0,774	1,084	0,202	0,352	11,009	9,908
8	2020	7,610	1,624	0,880	1,182	0,234	0,412	11,942	10,747
9	2021	8,068	1,769	0,986	1,284	0,266	0,471	12,844	11,560
10	2022	8,514	1,908	1,093	1,388	0,298	0,532	13,733	12,360
11	2023	8,955	2,045	1,200	1,495	0,330	0,593	14,619	13,157
12	2024	9,399	2,180	1,308	1,606	0,363	0,655	15,511	13,960
13	2025	9,852	2,314	1,418	1,720	0,395	0,719	16,417	14,775
14	2026	10,316	2,448	1,529	1,838	0,429	0,783	17,342	15,608
15	2027	10,795	2,584	1,641	1,960	0,462	0,849	18,291	16,462
16	2028	11,291	2,722	1,756	2,085	0,496	0,916	19,267	17,340

Lampiran 1. 3 Emisi Gas Metan Skenario 2 Reduksi 2

No	Tahun	Methane Generated							Methane Emission
		Food	Garden	Paper	Wood	Textile	Nappies	Total	
1	2013	0,384	0,072	0,116	0,064	0,000	0,000	0,635	0,572
2	2014	0,679	0,136	0,232	0,634	0,035	0,059	1,774	1,597
3	2015	0,893	0,192	0,341	0,706	0,070	0,118	2,321	2,089
4	2016	1,072	0,244	0,452	0,807	0,103	0,176	2,854	2,569
5	2017	1,215	0,291	0,560	0,894	0,137	0,235	3,332	2,998
6	2018	1,336	0,335	0,667	0,987	0,169	0,294	3,789	3,410
7	2019	1,444	0,375	0,774	1,084	0,202	0,352	4,230	3,807
8	2020	1,542	0,414	0,880	1,182	0,234	0,412	4,664	4,197
9	2021	1,635	0,450	0,986	1,284	0,266	0,471	5,093	4,584
10	2022	1,725	0,486	1,093	1,388	0,298	0,532	5,522	4,970
11	2023	1,815	0,521	1,200	1,495	0,330	0,593	5,954	5,359
12	2024	1,905	0,555	1,308	1,606	0,363	0,655	6,392	5,753
13	2025	1,996	0,589	1,418	1,720	0,395	0,719	6,837	6,154
14	2026	2,090	0,624	1,529	1,838	0,429	0,783	7,292	6,563
15	2027	2,187	0,658	1,641	1,960	0,462	0,849	7,757	6,982
16	2028	2,288	0,693	1,756	2,085	0,496	0,916	8,235	7,412

Lampiran 1. 4 Emisi Gas Metan Skenario 3 Reduksi 1

No	Tahun	Methane Generated							Methane Emission
		Food	Garden	Paper	Wood	Textile	Nappies	Total	
1	2013	1,893	0,281	0,104	0,064	0,000	0,000	2,342	2,108
2	2014	3,349	0,536	0,207	0,634	0,035	0,059	4,819	4,337
3	2015	4,408	0,754	0,305	0,706	0,070	0,118	6,362	5,725
4	2016	5,292	0,959	0,404	0,807	0,103	0,176	7,741	6,967
5	2017	5,996	1,143	0,501	0,894	0,137	0,235	8,906	8,015
6	2018	6,595	1,314	0,597	0,987	0,169	0,294	9,956	8,960
7	2019	7,124	1,473	0,692	1,084	0,202	0,352	10,928	9,835
8	2020	7,610	1,624	0,787	1,182	0,234	0,412	11,849	10,664
9	2021	8,068	1,769	0,882	1,284	0,266	0,471	12,740	11,466
10	2022	8,514	1,908	0,977	1,388	0,298	0,532	13,618	12,256
11	2023	8,955	2,045	1,073	1,495	0,330	0,593	14,492	13,043
12	2024	9,399	2,180	1,170	1,606	0,363	0,655	15,373	13,836
13	2025	9,852	2,314	1,268	1,720	0,395	0,719	16,268	14,641
14	2026	10,316	2,448	1,367	1,838	0,429	0,783	17,181	15,463
15	2027	10,795	2,584	1,468	1,960	0,462	0,849	18,117	16,306
16	2028	11,291	2,722	1,571	2,085	0,496	0,916	19,082	17,174

Lampiran 1. 5 Emisi Gas Metan Skenario 3 Reduksi 2

No	Tahun	Methane Generated							Methane Emission
		Food	Garden	Paper	Wood	Textile	Nappies	Total	
1	2013	0,384	0,072	0,058	0,064	0,000	0,000	0,577	0,520
2	2014	0,679	0,136	0,116	0,634	0,035	0,059	1,658	1,492
3	2015	0,893	0,192	0,171	0,706	0,070	0,118	2,150	1,935
4	2016	1,072	0,244	0,226	0,807	0,103	0,176	2,628	2,366
5	2017	1,215	0,291	0,280	0,894	0,137	0,235	3,052	2,746
6	2018	1,336	0,335	0,334	0,987	0,169	0,294	3,455	3,109
7	2019	1,444	0,375	0,387	1,084	0,202	0,352	3,844	3,459
8	2020	1,542	0,414	0,440	1,182	0,234	0,412	4,224	3,801
9	2021	1,635	0,450	0,493	1,284	0,266	0,471	4,600	4,140
10	2022	1,725	0,486	0,546	1,388	0,298	0,532	4,976	4,478
11	2023	1,815	0,521	0,600	1,495	0,330	0,593	5,354	4,819
12	2024	1,905	0,555	0,654	1,606	0,363	0,655	5,738	5,164
13	2025	1,996	0,589	0,709	1,720	0,395	0,719	6,129	5,516
14	2026	2,090	0,624	0,764	1,838	0,429	0,783	6,528	5,875
15	2027	2,187	0,658	0,821	1,960	0,462	0,849	6,937	6,243
16	2028	2,288	0,693	0,878	2,085	0,496	0,916	7,357	6,621

Lampiran 2 Kuosioner Responden

Pada setiap pertanyaan, terdapat 2 kriteria yang akan dibandingkan untuk mengetahui skala kepentingannya. Beri tanda centang pada kolom skala yang sesuai dengan pendapat Anda. Semakin tinggi angka skala yang dipilih, berarti tingkat kepentingan kriteria tersebut juga semakin besar.

Definisi angka skala :

- 1 : kedua kriteria sama penting
- 3 : kriteria sedikit lebih penting dibanding kriteria pembandingnya
- 5 : kriteria lebih penting dibanding kriteria pembandingnya
- 7 : kriteria sangat lebih penting dibanding kriteria pembandingnya
- 9 : kriteria mutlak lebih penting dibanding kriteria pembandingnya
- 2,4,6,8 : nilai tengah

1.Pertanyaan Kuesioner

1. 1 Aspek

Pada pemilihan teknolgi pemanfaatan gas metan, terdapat 2 aspek yang akan dibandingkan yaitu :

1. Aspek lingkungan
2. Aspek teknis

Manakah aspek yang lebih penting dalam melakukan pemilihan teknologi pemanfaatan gas metan :

Kriteria A	Skala									Skala								Kriteria B
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Lingkungan																		Teknis
Keterangan :																		

1.2 Aspek Teknis

Pada aspek teknis, terdapat 5 kriteria yang akan dibandingkan yaitu :

1. Aplikasi: Kecocokan penggunaan dengan banyaknya gas metan dan laju produksi gas metan
2. Pemanfaatan: Pemanfaatan dari hasil teknologi pengolahan emisi gas metan bagi masyarakat, internal TPA, atau dijual
3. Operasi: Kemudahan untuk mengoperasikan teknologi
4. Perawatan: Kemudahan dalam merawat dan menjaga teknologi
5. Komposisi sampah: Besarnya komposisi sampah yang menunjang produksi gas metan

Manakah kriteria yang lebih penting dalam melakukan pemilihan teknologi pemanfaatan gas metan berdasarkan aspek teknis:

Kriteria A	Skala										Skala								Kriteria B
	9	8	7	6	5	4	3	2	1		2	3	4	5	6	7	8	9	
Aplikasi																		Pemanfaatan	
Aplikasi																		Operasi	
Aplikasi																		Perawatan	
Aplikasi																		Komposisi	
Pemanfaatan																		Operasi	
Pemanfaatan																		Perawatan	
Pemanfaatan																		Komposisi	
Operasi																		Perawatan	
Operasi																		Komposisi	

Kriteria A	Skala										Skala								Kriteria B
	9	8	7	6	5	4	3	2	1		2	3	4	5	6	7	8	9	
Peawatan																		Komposisi	

1.3 Aspek Lingkungan

Pada pengolahan emisi gas metan, terdapat 2 kriteria yang akan dibandingkan yaitu :

1. Kemampuan *removal* emisi gas metan.
2. Potensi polutan yang timbul dari proses seperti eutrofikasi, nitrifikasi, PM₁₀, PM₂₅, kebisingan, dan lain lain.

Manakah kriteria yang lebih penting dalam pemilihan pengolahan emisi gas metan berdasarkan aspek lingkungan :

Kriteria A	Skala										Skala									Kriteria B
	9	8	7	6	5	4	3	2	1		2	3	4	5	6	7	8	9		
<i>Removal</i>																		<i>Potensi Polutan</i>		

1.4 Pemilihan Teknologi Aspek Teknis

Teknologi yang akan dibandingkan yaitu :

1. Metan menjadi listrik
2. Metan dibakar menggunakan sistem *enclosed flare*
3. Metan dikonversi menjadi Biogas

Berdasarkan pengaplikasian, teknologi yang lebih baik adalah :

Kriteria A	Skala										Skala									Kriteria B
	9	8	7	6	5	4	3	2	1		2	3	4	5	6	7	8	9		
Listrik																		Flare		
Listrik																		Biogas		
Biogas																		Flare		
Keterangan :																				

Berdasarkan pemanfaatannya, teknologi yang lebih baik adalah :

Kriteria A	Skala										Skala									Kriteria B
	9	8	7	6	5	4	3	2	1		2	3	4	5	6	7	8	9		
Listrik																			Flare	
Listrik																			Biogas	
Biogas																			Flare	
Keterangan :																				

Berdasarkan pengoperasiannya, teknologi yang lebih mudah adalah :

Kriteria A	Skala										Skala									Kriteria B
	9	8	7	6	5	4	3	2	1		2	3	4	5	6	7	8	9		
Listrik																		Flare		

Kriteria A	Skala									Skala								Kriteria B
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Listrik																		Biogas
Biogas																		Flare
Keterangan :																		

Berdasarkan perawatannya, teknologi yang lebih mudah adalah :

Kriteria A	Skala									Skala								Kriteria B
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Listrik																		Flare
Listrik																		Biogas
Biogas																		Flare

Berdasarkan komposisi sampah yang ada, teknologi yang lebih cocok adalah :

Kriteria A	Skala										Skala									Kriteria B
	9	8	7	6	5	4	3	2	1		2	3	4	5	6	7	8	9		
Listrik																		Flare		
Listrik																		Biogas		
Biogas																		Flare		
Keterangan :																				

1.5 Pemilihan Teknologi Aspek Lingkungan

Teknologi yang akan dibandingkan yaitu :

1. Metan menjadi listrik
2. Metan dibakar menggunakan sistem *enclosed flare*

3. Metan dikonversi menjadi Biogas

Berdasarkan removal, teknologi yang mampu *removal* gas metan lebih baik adalah :

Kriteria A	Skala										Skala									Kriteria B
	9	8	7	6	5	4	3	2	1		2	3	4	5	6	7	8	9		
Listrik																		Flare		
Listrik																		Biogas		
Biogas																		Flare		
Keterangan :																				

Berdasarkan potensi polusi yang ditimbulkan dari proses pengolahan, teknologi yang lebih sedikit memiliki polusi adalah :

Kriteria A	Skala										Skala									Kriteria B
	9	8	7	6	5	4	3	2	1		2	3	4	5	6	7	8	9		
Listrik																		Flare		
Listrik																		Biogas		
Biogas																		Flare		
Keterangan :																				

Lampiran 3 Konversi Gas Metan menjadi Listrik

Lampiran 3.1 Konversi Gas Metan Menjadi Listrik

No	Tahun	Methane Emission (Gg)	Methane Emission (kg)	Methane Emission (m3/tahun)	Methane Emission (m3/hari)	Methane Emission (m3/jam)	Potensi Listrik (kW)	Potensi Listrik (Megawatt)
1	2013	2,210	2.210.168,36	306.967.827,50	841.007,75	35.041,99	163.383,28	0,163383276
2	2014	4,531	4.530.838,45	629.283.118,11	1.724.063,34	71.835,97	334.935,22	0,334935221
3	2015	5,996	5.995.822,02	832.753.057,64	2.281.515,23	95.063,13	443.231,86	0,443231864
4	2016	7,309	7.309.136,56	1.015.157.856,07	2.781.254,40	115.885,60	540.316,61	0,54031661
5	2017	8,421	8.420.951,99	1.169.576.664,75	3.204.319,63	133.513,32	622.505,84	0,622505845
6	2018	9,425	9.425.481,87	1.309.094.703,62	3.586.560,83	149.440,03	696.764,16	0,696764162
7	2019	10,356	10.355.567,17	1.438.273.217,82	3.940.474,57	164.186,44	765.519,28	0,765519278
8	2020	11,238	11.237.602,19	1.560.778.081,31	4.276.104,33	178.171,01	830.722,35	0,830722352
9	2021	12,091	12.091.044,69	1.679.311.763,17	4.600.854,15	191.702,26	893.811,77	0,893811769
10	2022	12,930	12.930.405,67	1.795.889.677,00	4.920.245,69	205.010,24	955.860,23	0,95586023

No	Tahun	Methane Emission (Gg)	Methane Emission (kg)	Methane Emission (m3/tahun)	Methane Emission (m3/hari)	Methane Emission (m3/jam)	Potensi Listrik (kW)	Potensi Listrik (Megawatt)
11	2023	13,767	13.766.665,45	1.912.036.867,86	5.238.457,17	218.269,05	1.017.679,44	1,01767944
12	2024	14,608	14.608.283,07	2.028.928.204,63	5.558.707,41	231.612,81	1.079.894,72	1,079894721
13	2025	15,462	15.461.917,08	2.147.488.483,04	5.883.530,09	245.147,09	1.142.998,29	1,142998294
14	2026	16,333	16.332.941,24	2.268.464.060,64	6.214.970,03	258.957,08	1.207.387,41	1,207387407
15	2027	17,226	17.225.814,67	2.392.474.259,05	6.554.724,00	273.113,50	1.273.391,69	1,273391693
16	2028	18,144	18.144.348,28	2.520.048.372,72	6.904.242,12	287.676,75	1.341.292,87	1,34129287
Total Potensi Listrik								13,30969503

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOGRAFI PENULIS



Penulis merupakan putra kelahiran Jakarta yang lahir pada 30 Mei 1995. Penulis mengenyam pendidikan dasar pada tahun 2001-2007 di SDN Batan Indah Serpong. Kemudian dilanjutkan di SMP Islam Al-Azhar Bumi Serpong Damai Tangerang Selatan pada tahun 2007-2010 sedangkan sekolah tingkat atas dilalui di SMAN 55 Jakarta Selatan dari tahun 2010-2013. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan di S1 Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, ITS, Surabaya pada tahun 2013 dengan NRP 3313 100 079.

Selama perkuliahan, penulis aktif di berbagai organisasi kemahasiswaan. Penulis aktif di organisasi HMTL FTSP ITS di Departemen PSDM sebagai kepala departemen, sebagai staff di Kementrian PSDM BEM ITS, dan staff Departemen Dalam Negeri di Ikatan Mahasiswa Teknik Lingkungan Indonesia. Kegiatan pelatihan pengembangan diri serta seminar dibidang teknik lingkungan banyak diikuti dalam rangka pengembangan diri sebagai mahasiswa antara lain LKMM TM FTSP X dan *Leadership Organization Training* HMTL FTSP ITS. Penulis dapat dihubungi via email usmanazka@gmail.com dan telfon 087851091612.